

4. – 6. März 2020

# Programm

*Kurzfassungen zum Download unter:*

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

## Mittwoch, 4. März 2020

nachmittags **Anreise**

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

## Donnerstag, 5. März 2020

**08:45 – 09:00** **Eröffnung und Begrüßung** (Stadthalle, Haupttagungsraum im EG)

*Prof. Martin Horn (Technische Universität Graz)*

### Haupttagungsraum im EG

### Tagungsraum im 3. OG

Haupttagungsraum im EG		Tagungsraum im 3. OG	
<b>09:00 – 10:00</b>	<b>Modellprädiktive Verfahren</b> Sitzungsleitung: Prof. Knut Graichen	<b>Lernende Verfahren</b> Sitzungsleitung: Prof. Boris Lohmann	
09:00 – 09:30	Computationally Efficient Trajectory Planning in Unknown Environments Using Iterative Linear Model Predictive Control <i>Giuliano Costantini (Fachgebiet für Elektromobilität, Technische Universität Kaiserslautern, Prof. Daniel Görge, Gr. 16)</i>	Manifold Learning für Hyperspektrale Daten <i>Florian Becker (Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, Karlsruher Institut für Technologie, Prof. Jürgen Beyerer, Gr. 18)</i>	
09:30 – 10:00	Modellprädiktive Bewegungsplanung für Fahrsimulatoren unter Schätzung des Fahrerhaltens <i>Alexander Lamprecht (Lehrstuhl für Regelungstechnik, FAU Erlangen-Nürnberg, Prof. Knut Graichen, Gr. 12)</i>	Lernende Verfahren zur Konstruktion von erreichbaren Mengen im fahrdynamischen Grenzbereich <i>Alexander Wischnewski (Lehrstuhl für Regelungstechnik, Technische Universität München, Prof. Boris Lohmann, Gr. 22)</i>	
<b>10:00 – 10:30</b>	<b>Kaffee-/Teepause</b> im Foyer der Stadthalle		

4. – 6. März 2020

## Haupttagungsraum im EG

## Tagungsraum im 3. OG

10:30 – 12:00 <b>Vernetzte Systeme I</b> Sitzungsleitung: Prof. Jan Lunze		<b>Zuverlässige Systeme und Anwendungen</b> Sitzungsleitung: Prof. Stefan Jakubek	
10:30 – 11:00	Cyber-Security von vernetzten ereignisdiskreten Systemen <i>Raphael Fritz (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik, Technische Universität Kaiserslautern, Prof. Ping Zhang, Gr. 16)</i>		Integritätsbestimmung eines satellitenbasierten Multisensor-Navigationssystems <i>Shuchen Liu (Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen, Prof. Dirk Abel, Gr. 1)</i>
11:00 – 11:30	Efficient Solution of Distributed Mixed Integer Programming in Control of Networked Systems <i>Zonglin Liu (FG Regelungs- und Systemtheorie, FB Elektrotechnik/Informatik, Universität Kassel, Prof. Olaf Stursberg, Gr. 19)</i>		Effiziente Gaußprozess-Regression zur Modellierung und Kompensation von unbekanntem Einflussfaktoren <i>Jan Graßhoff (Institut für Medizinische Elektrotechnik, Universität zu Lübeck, Prof. Philipp Rostalski, Gr. 25)</i>
11:30 – 12:00	Fehlertolerante Steuerung vernetzter Regelungssysteme mit flexibler Aufgabenverteilung <i>Kai Schenk (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, Ruhr-Universität Bochum, Prof. Jan Lunze, Gr. 3)</i>		Flachheits-basierende diskrete Regelung eines Batterieemulators für Lasten mit konstanter Leistungsaufnahme <i>Michael Zauner (Institut für Mechanik und Mechatronik, Technische Universität Wien, Prof. Stefan Jakubek, Gr. 29)</i>

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

14:30 – 15:30 <b>Vernetzte Systeme II</b> Sitzungsleitung: Prof. Andreas Rehkopf		<b>Mensch-Roboter Interaktion</b> Sitzungsleitung: Prof. Robert Riener	
14:30 – 15:00	Dynamical Processes on Social Networks: Modeling, Analysis, and Control <i>Fangzhou Liu (Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Technische Universität München, Prof. Martin Buss, Gr. 21)</i>		Ein geschwindigkeitsbasierter Störbeobachter zur Verbesserung einer Exoskelettregelung in der Rehabilitation <i>Fabian Just (Sensory-Motor Systems Lab, ETH Zürich; Universitätsklinik Balgrist, Universität Zürich, Prof. Robert Riener, Gr. 8)</i>
15:00 – 15:30	MPC unterstütztes EMS für vernetzte HES <i>Sebastian Schwarz (Institut für Automatisierungstechnik, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Prof. Andreas Rehkopf, Gr. 10)</i>		Shared control for haptic human-robot interaction <i>Selma Music (Lehrstuhl für Informationstechnische Regelung, Technische Universität München, Prof. Sandra Hirche, Gr. 21)</i>
15:30 – 16:00 <b>Kaffee-/Teepause</b> im Foyer der Stadthalle			

**16:00 – 17:00 Plenarvortrag** im Haupttagungsraum EG

**Cyber-physical control of automated transport systems and their influence on road traffic**

*Prof. Karl H. Johansson (KTH Royal Institute of Technology, Sweden)*

**17:00 – 17:15 Vorstellung der neuen Professuren**

**17:15 – 17:30 Vergabe der at-Preise** im Haupttagungsraum EG

Auszeichnung herausragender Beiträge der Zeitschrift at-Automatisierungstechnik durch den Herausgeber

**18:15 Abendessen** im Bellevue Rheinhotel

## Freitag, 6. März 2020

### Haupttagungsraum im EG

### Tagungsraum im 3. OG

<b>08:30 – 10:00</b>	<b>Regelungstheorie</b> Sitzungsleitung: Prof. Klaus Röbenack	<b>Produktions- und Fertigungssysteme</b> Sitzungsleitung: Prof. Christian Diedrich
08:30 – 09:00	Systematische Analyse und Entwurf von Regelungseinrichtungen auf Basis von Lyapunov's direkter Methode <i>Rick Voßwinkel (Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie, Technische Universität Dresden, Prof. Klaus Röbenack, Gr. 9)</i>	Semantische Interoperabilität in cyber-physikalischen Produktionssystemen <i>Tizian Schröder (Institut für Automatisierungstechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Prof. Christian Diedrich, Gr. 20)</i>
09:00 – 09:30	Output constrained sliding mode control: A variable gain approach <i>Mark Spiller (Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik, Universität Duisburg-Essen, Prof. Dirk Söffker, Gr. 11)</i>	Adaptive und lernfähige Regelung der Qualität basierend auf LSTM Netzen am Beispiel der diskreten Fertigung <i>Benjamin Lindemann (Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme, Universität Stuttgart, Prof. Michael Weyrich, Gr. 27)</i>
09:30 – 10:00	IDA-PBC for Underactuated Mechanical System in Implicit Representation <i>Oscar Cieza (Fachgebiet Regelungstechnik, Technische Universität Ilmenau, Prof. Johann Reger, Gr. 15)</i>	

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

4. – 6. März 2020

## Haupttagungsraum im EG

## Tagungsraum im 3. OG

10:30 – 12:00	<b>Fahrzeugführung</b> Sitzungsleitung: Prof. Klaus Dietmayer	<b>Zustands- und Parameterschätzung</b> Sitzungsleitung: Prof. Rudibert King
10:30 – 11:00	Multimodale Optimierung zur energieoptimalen Trajektorienplanung von Schienenfahrzeugen <i>Lukas Pröhl (Lehrstuhl für Mechatronik, Universität Rostock, Prof. Harald Aschemann, Gr. 24)</i>	Entwurf effizienter Beobachter mittels Spektraltheorie für linear-zeitvariante Systeme <i>Markus Tranninger (Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik, Technische Universität Graz, Prof. Martin Horn, Gr. 7)</i>
11:00 – 11:30	Verhaltensentscheidung für automatisierte Fahrzeuge mittels Arbitrationsgraphen <i>Piotr Orzechowski (Institut für Mess- und Regelungstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Prof. Christoph Stiller, Gr.17)</i>	Kalman-Filter als Beobachter in der Anwendung <i>Benedikt Haus (Lehrstuhl für Regelungs- und Antriebstechnik, Institut für Produkt- und Prozessinnovation, Leuphana Universität Lüneburg, Prof. Paolo Mercorelli, Gr. 6)</i>
11:30 – 12:00	Optimale Bewegungsplanung mit Unsicherheitsbewertung für vollautomatisierte Einfädelmanöver unter Nutzung unsicherer Sensordaten aus der Infrastruktur <i>Johannes Müller (Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm, Prof. Klaus Dietmayer, Gr. 28)</i>	Rekursive Kennfeld-Schätzung <i>Maik Gentsch (Fachgebiet Mess und Regelungstechnik, Technische Universität Berlin, Prof. Rudibert King, Gr. 2)</i>

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

**Prämierung des besten Vortrags**

durch Dr. Michael Paulweber, AVL List GmbH, Graz

**Aufruf für Boppard 2021**

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

**13:45 Ende des Kolloquiums**

# Computationally Efficient Trajectory Planning in Unknown Environments Using Iterative Linear Model Predictive Control

Giuliano Costantini

Fachgebiet für Elektromobilität  
Technische Universität Kaiserslautern  
costantini@eit.uni-kl.de

Daniel Görge

Fachgebiet für Elektromobilität  
Technische Universität Kaiserslautern  
goerges@eit.uni-kl.de

**Keywords:** Model predictive control, trajectory planning

Many applications including automated driving [1], advanced driver assistance systems [2], robot motion control [3] and coordination problems [4] rely on the ability to rapidly compute a new trajectory while interacting with an unknown and possibly changing environment. Often the planning problem should meet several criteria and constraints such as providing a smooth motion, satisfying actuator limitations, minimizing energy consumption, avoiding obstacles or follow a predetermined path, to name a few. All these requirements make it virtually impossible to use traditional control strategies except for a few simple cases. Over the last two decades model predictive control (MPC) has emerged as a promising technique to solve this type of problems [5]. One advantage is that the system dynamics can be explicitly included during the planning process, resulting in a feasible and optimal trajectory. Furthermore the inherent ability to handle difficult constraints and at the same time taking possibly opposite goals into account makes MPC the natural choice for many trajectory planning problems.

In MPC an underlying optimization problem must be solved online at each time instant. This is in general a very demanding step and as a consequence the time spent computing a new plan might become prohibitively long. Most of the applications which require trajectory planning are characterized by small sampling times. Thus it is crucial to provide a computationally efficient solution to the problem [6].

The present contribution achieves this goal in three steps. First the original trajectory planning problem, whose nature is strongly nonlinear and nonconvex, is iteratively approximated during the optimization routine. At each iteration linear constraints are adapted based on the current plan and the information from the nearby environment. The problem is recast into a sequence of simple linear model predictive control instances for which efficient quadratic programming algorithms are available. In the second step the structure of the dynamic constraint is employed to further reduce the optimization problem complexity. Finally in the last step warm starting procedures are used to exploit the similarity between successive problem approximations. A simulation platform has been developed and will be used to show the effectiveness of the proposed method.

The concept can be readily extended to multi-agent systems. In this domain the overall system is naturally seen as the composition of simpler systems denoted as agents in a network [7, 8]. For instance, in robot coordination tasks [9], each robot is seen as an agent. Here instead of solving a large global problem at some central node, it is natural to split the optimization across the network by employing distributed optimization algorithms [10]. This procedure permits a parallel computation taking full advantage of the resources available across the network.

## Literature

- [1] Brian Paden, Michal Čáp, Sze Zheng Yong, Dmitry Yershov, and Emilio Frazzoli. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 1(1):33-55, 2016.
- [2] Tamás Keviczky, Paolo Falcone, Francesco Borrelli, Jahan Asgari, and Davor Hrovat. Predictive control approach to autonomous vehicle steering. In *Proceedings of 2006 IEEE American Control Conference*, Minneapolis, MN, USA, 2006.
- [3] Mikael Svenstrup, Thomas Bak, and Hans Jørgen Andersen. Trajectory planning for robots in dynamic human environments. In *Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Taiwan, 2010.
- [4] Marcello Farina, Andrea Perizzato, and Riccardo Scattolini. Application of distributed predictive control to motion and coordination problems for unicycle autonomous robots. *Robotics and Autonomous Systems* 72:248-260, 2015.
- [5] E. Kim, J. Kim, and M. Sunwoo. Model predictive control strategy for smooth path tracking of autonomous vehicles with steering actuator dynamics. *International Journal of Automotive Technology* 15(7):1155-1164, 2014.
- [6] Alexander Liniger, Alexander Domahidi, and Manfred Morari. "Optimization-based autonomous racing of 1:43 scale RC cars. *Optimal Control Applications and Methods* 36(5):628-647, 2015.
- [7] Giuliano Costantini, Ramin Rostami, and Daniel Görge. Fast separable terminal cost synthesis for distributed MPC. In *Proceedings of the European Control Conference 2019*, Naples, Italy, 2019.
- [8] Giuliano Costantini, Ramin Rostami, and Daniel Görge. Distributed linear quadratic regulator for the synthesis of a separable terminal cost for distributed model predictive control. In *Proceedings of the 57th IEEE Conference on Decision and Control*, Miami, FL, USA, 2018.
- [9] Giuliano Costantini, Ramin Rostami, and Daniel Görge. Online trajectory planning and collision avoidance for a group of robots using distributed model predictive control. In *Proceedings of the 28th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region*, Kaiserslautern, Germany, 2019.
- [10] Giuliano Costantini, Ramin Rostami, and Daniel Görge. Decomposition methods for distributed quadratic programming with application to distributed model predictive control. In *Proceedings of the 2018 56th Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, Allerton House, UIUC, IL, USA, 2018.

# Modellprädiktive Bewegungsplanung für Fahrsimulatoren unter Schätzung des Fahrerverhaltens

Alexander Lamprecht

Lehrstuhl für Regelungstechnik  
FAU Erlangen-Nürnberg  
alexander.lamprecht@fau.de

Knut Graichen

Lehrstuhl für Regelungstechnik  
FAU Erlangen-Nürnberg  
knut.graichen@fau.de

**Schlüsselwörter:** Motion Cueing, modellprädiktive Regelung (MPC), Bewegungsplanung

Fahrsimulatoren sind ein in der Automobilindustrie häufig eingesetztes Werkzeug, um neue Assistenzsysteme und Fahrwerkskomponenten in einer sicheren und reproduzierbaren Umgebung zu testen. Damit die dabei gewonnenen Ergebnisse in die Praxis übertragbar sind, ist es elementar, dass ein möglichst realitätsnaher Bewegungseindruck für die Testpersonen im Simulator erzeugt wird. Die große Herausforderung stellt dabei der stark eingeschränkte Bewegungsspielraum technischer Simulationssysteme dar. Die Algorithmen, die zur Bewegungsplanung von Simulatoren verwendet werden, die sogenannten Motion Cueing-Algorithmen, basieren dabei klassischerweise auf einer Kombination von linearen, zeitinvarianten Filtern. Da diese Verfahren die Bewegungsgrenzen der Simulationssysteme nicht explizit in der Planung berücksichtigen, müssen diese Algorithmen stets sehr konservativ parametrisiert werden, was zu einer stark skalierten Bewegungsrückmeldung sowie einer nur suboptimalen Ausnutzung des vorhandenen Bewegungsspielraums für Standardmanöver führt. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren vermehrt Motion Cueing-Algorithmen auf Basis der modellprädiktiven Regelung entwickelt [7, 8]. Dabei wird die Problemstellung als Optimierungsproblem auf bewegtem Horizont formuliert und die Grenzen des Bewegungssystems direkt als Beschränkungen berücksichtigt.

Im Rahmen des Vortrags wird ein modellprädiktiver Ansatz zur Bewegungsplanung des Daimler-Fahrsimulators bestehend aus einem Hexapoden und einer Linearachse vorgestellt [6]. Das Problem wird dabei in kartesischen Koordinaten definiert und die Aktorgrößen über die inverse Kinematik berechnet [1]. Des Weiteren wird die menschliche Wahrnehmung in der Bewegungsplanung berücksichtigt, indem als Referenzwerte für die Planung nicht die physikalischen Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten, sondern die durch ein Wahrnehmungsmodell gefilterten Größen verwendet werden [3]. Das resultierende nichtlineare MPC-Problem umfasst insgesamt 29 Zustandsgrößen, 7 Stellgrößen und 42 nichtlineare Beschränkungen der Aktorpositionen, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen. Für die echtzeitfähige Implementierung des modellprädiktiven Reglers kommt die erweiterte Lagrange-Methode zum Einsatz, die in der MPC-Toolbox GRAMPC [4, 5] implementiert ist und trotz der Problemkomplexität Rechenzeiten im einstelligen Millisekunden-Bereich mit nahezu konstanter Rechenlast ermöglicht.

Für die Online-Anwendung des Verfahrens ist es zusätzlich nötig, die zukünftigen Referenzwerte, d.h. das zukünftige Fahrerverhalten, zu schätzen, um das prädiktive Potential der Regelung voll ausnutzen zu können. Dazu wird der Fahrer als optimierungsbasierter Regelkreis modelliert, mit dem Ziel, das Fahrzeug auf einer vordefinierten Route einzuregeln

[2]. Dabei stehen dem Regler Kontextinformationen über den zukünftigen Streckenverlauf sowie die aktuellen Ausgangsgrößen der Fahrdynamiksimulation zur Verfügung. Die resultierende Grundstruktur ist in Abbildung 1 dargestellt, wobei neben der Qualität der geschätzten zukünftigen Referenzwerte auch die Echtzeitanforderung von 4 Millisekunden Abtastzeit für die Fahrerschätzung und das MPC-basierte Motion Cueing erfüllt sein muss.

Die Güte und die Echtzeitfähigkeit des kombinierten Ansatzes aus Referenzgenerierung und Bewegungsplanung wird anhand von Simulationsbeispielen und Tests am realen Simulator für typische Fahrmanöver demonstriert. Außerdem zeigt ein Vergleich mit dem klassischen filterbasierten Ansatz das große Potential des entwickelten Verfahrens.

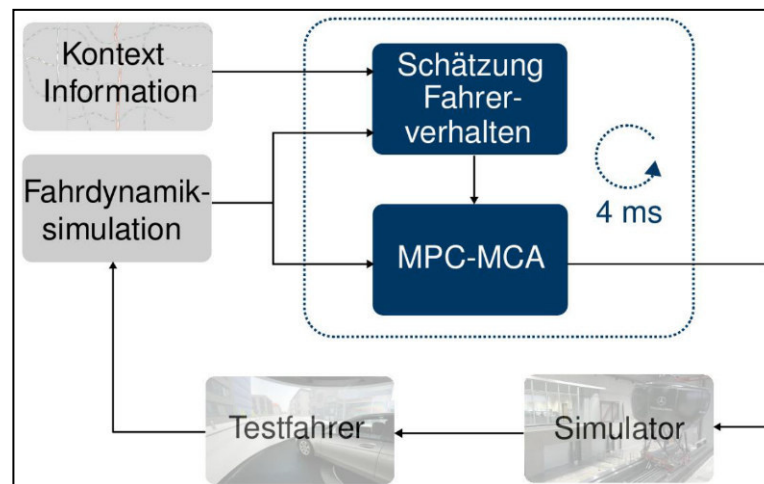


Abbildung 1: Regelungstechnische Grundstruktur

## Literatur

- [1] A. Lamprecht, J. Haecker und K. Graichen. Constrained motion cueing for driving simulators using a real-time nonlinear MPC scheme. In: *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, S. 7466-7471, Madrid (Spanien), Oktober 2018.
- [2] A. Lamprecht, D. Steffen, J. Haecker und K. Graichen. Optimal control based reference generation for model predictive motion cueing algorithms. In: *Proc. IEEE Conference on Control Technology and Applications (CTA)*, Hong Kong, August 2019.
- [3] A. Lamprecht, D. Steffen, J. Häcker, und K. Graichen. Comparison between a Filter- and an MPC-based MCA in an Offline Simulator Study. In *Proc. Driving Simulation Conference & Exhibition (DSC)*, S. 101-107, Strasbourg (Frankreich), 2019.
- [4] B. Käpernick und K. Graichen. The gradient based nonlinear model predictive control software GRAMPC. In: *Proc. European Control Conference (ECC)*, S. 1170-1175, Strasbourg (Frankreich), Juni 2014.
- [5] T. Englert, A. Völz, F. Mesmer, S. Rhein und K. Graichen. A software framework for embedded nonlinear model predictive control using a gradient-based augmented Lagrangian approach (GRAMPC). *Optimization and Engineering*, 20: S. 769-809, 2018.
- [6] E. Zeeb. Daimler's new full-scale, high-dynamic driving simulator - a technical overview. *Actes INRETS*, S. 157-165, 2010.
- [7] A. Beghi, M. Bruschetta und F. Maran. A real time implementation of MPC based motion cueing strategy for driving simulators. In: *Proc. IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, S. 6340-6345, Maui (Hawaii), Dezember 2012.
- [8] M. Katliar, F. M. Drop, H. Teufel, M. Diehl und H. H. Bühlhoff. Real-time nonlinear model predictive control of a motion simulator based on a 8-DOF serial robot. In: *Proc. European Control Conference (ECC)*, S. 1529-1535, Limassol (Zypern), Juni 2018.



# Manifold Learning für Hyperspektrale Daten

Florian Becker

Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme (IES)  
Karlsruher Institut für Technologie  
florian.becker@kit.edu

Jürgen Beyerer

Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme (IES)  
Karlsruher Institut für Technologie  
juergen.beyerer@iosb.fraunhofer.de

**Schlüsselwörter:** Nichtlineare Dimensionsreduktion, manifold learning, Hyperspektraldaten

Die einzelnen Dimensionen oder Merkmale hochdimensionaler Daten sind in der Praxis oft korreliert. Die Hauptkomponentenanalyse (engl. *principal component analysis* (PCA)) ist ein in der klassischen Mustererkennung bis hin zur Chemometrie gängiges Verfahren, um Daten in einen niedrigdimensionalen Raum zu projizieren. Die Transformation der Datenpunkte erfolgt über eine orthogonale Matrix, die aus den Eigenvektoren der Kovarianzmatrix der Datenbasis berechnet wird. Es handelt sich bei der PCA um ein lineares Verfahren, das eine bezüglich des euklidischen Abstands optimale Approximation der Daten liefert.

Nichtlineare Verfahren zur Dimensionsreduktion basieren auf der Annahme, dass die Menge der Daten eine niedrigdimensionale Mannigfaltigkeit in einem hoch-dimensionalen Raum bildet. Die nichtlineare Dimensionsreduktion wird daher auch *manifold learning* genannt. Eine Reihe von verschiedenen *manifold learning* Algorithmen versuchen diese Mannigfaltigkeiten auszumachen, indem sie über einen graphenbasierten Ansatz eine diskrete Approximation der niedrigdimensionalen Mannigfaltigkeit berechnen. Diese graphenbasierte Darstellung der Mannigfaltigkeit kann dann für die Einbettung in einen Unterraum benutzt werden.

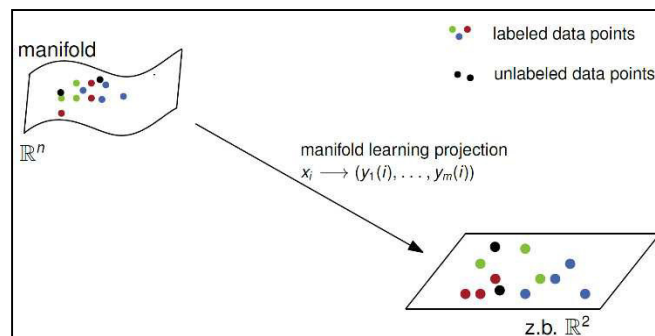


Abbildung 1: schematische Projektion einer Mannigfaltigkeit auf einen niedrigdimensionalen Unterraum. Hier werden gelabelte und ungelabelte Daten zusammen projiziert. Die ungelabelten Daten können dann im Unterraum klassifiziert werden.

In der Vergangenheit wurden Algorithmen aus dem Umfeld der nichtlinearen Dimensionsreduktion auch auf hyperspektrale Daten angewandt [1,2]. *Manifold learning* eignet sich für die Analyse dieser Daten vor allem wegen der hohen spektralen Auflösung, der Korrelation benachbarter Bänder, sowie nichtlinearer Effekte. Diese nichtlinearen Effekte beginnen schon mit der Bildgewinnung und können sich entsprechend innerhalb eines Datenpunkts, aber auch in der Gesamtheit des Datensatzes niederschlagen.

Im Vortrag werden zunächst die Grundlagen des *manifold learnings* vorgestellt. Hierfür wird in Grundzügen die Funktionsweise eines bekannten Vertreters erläutert (*Laplacian Eigenmaps* [3]). Anschließend an die theoretischen Betrachtungen wird gezeigt, wie *manifold learning* für eine semi-überwachte Klassifikationsaufgabe mit hyperspektralen Daten eingesetzt werden kann.

## Literatur

- [1] Lunga, D., Prasad, S., Crawford, M.M. and Ersoy, O., 2013. Manifold-learning-based feature extraction for classification of hyperspectral data: A review of advances in manifold learning. *IEEE Signal Processing Magazine*, 31(1), pp.55-66.
- [2] Becker F., 2018. Supervised Laplacian Eigenmaps for Hyperspectral Data. *Proceedings of the 2018 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory*. Ed.: J. Beyerer.
- [3] Belkin, M. and Niyogi, P., 2003. Laplacian eigenmaps for dimensionality reduction and data representation. *Neural computation*, 15(6), pp.1373-1396.

# Lernende Verfahren zur Konstruktion von erreichbaren Mengen im fahrdynamischen Grenzbereich

Alexander Wischnewski

Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Technische Universität München  
alexander.wischnewski@tum.de

Boris Lohmann

Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Technische Universität München  
lohmann@tum.de

**Schlüsselwörter:** Erreichbare Mengen, Lernende Verfahren, Autonomes Fahren, Robuste Regelung

An Konzepte für die Regelung von autonomen Fahrzeugen werden sowohl hohe Performance- als auch Robustheitsanforderungen gestellt. Zentrale Bedeutung bei der theoretischen Absicherung der zu erreichenden Anforderungen kommt der Quantifizierung von externen Störeinflüssen und Modellfehlern zu. In realen Fahrscenarien sind diese sowohl von den aktuellen Umgebungsbedingungen als auch von den gewählten Arbeitspunkten abhängig. Dies führt insbesondere bei Fahrmanövern im physikalischen Grenzbereich zu sehr konservativen Abschätzungen, welche wiederherum in einem konservativen Fahrverhalten resultieren.

In diesem Vortrag wird ein zur Laufzeit arbeitendes Lernverfahren zur Charakterisierung der auf das System wirkenden Störungen vorgestellt. Diese können anschließend in einem robusten Regelungsentwurf, beispielsweise einem Tube-MPC ([1], [2], [3]) verwendet werden, um eine erreichbare Menge in Regelfehlerkoordinaten zu konstruieren (siehe Abbildung 1). Mit Hilfe dieser kann die Einhaltung der sicherheitsrelevanten Zustandsbeschränkungen garantiert werden [5].

Der vorgestellte Ansatz lernt eine obere und eine untere Schranke für die auf das geregelte System wirkenden Störungen in Abhängigkeit von Zustands- und Eingangsgrößen. Im Gegensatz zu in der Literatur verbreiteten probabilistischen Ansätzen ([1], [4]) werden deterministische Schranken gelernt. Da diese auf Annahmen über zu Grunde liegende Wahrscheinlichkeitsdichten verzichten, erweisen sie sich in der praktischen Anwendung als zuverlässiger und weniger anfällig gegenüber Fehlannahmen. Eine besondere Herausforderung bei der Implementierung stellt der Beginn des Betriebs (wenig Daten vorhanden) und der Dauerbetrieb (unendlich Daten vorhanden) dar. Das Konzept wird an einem nichtlinearen Zweispurmodell

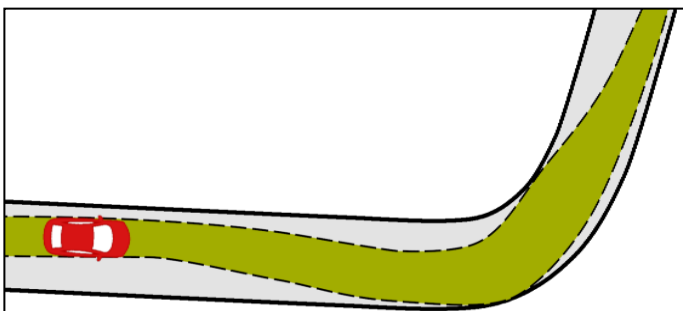


Abbildung 1: Visualisierung der erreichbaren Menge in Regelfehlerkoordinaten



Abbildung 2: Autonomes Elektrorennfahrzeug „DevBot 2.0“ auf der Rennstrecke Montebianco, Spanien

auf einem Hardware-in-the-Loop Prüfstand evaluiert und ein Vergleich zu in der Literatur verbreiteten Ansätzen zur Störidentifikation mittels Gauß-Prozessen durchgeführt.

Das Vorhaben ist eingebettet in das Kooperationsprojekt „Roborace“ zwischen dem Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik und dem Lehrstuhl für Regelungstechnik der TU München. Die entwickelten Verfahren werden in regelmäßigen Abständen im Fahrzeugversuch erprobt und dienen somit der Evaluation als auch der Identifikation von relevanten Forschungsfragen.

## Literatur

- [1] T. Koller et al. „Learning-based Model Predictive Control for Safe Exploration“. In: *Proceedings of the IEEE 57<sup>th</sup> Conference on Decision and Control (CDC)*. 2018.
- [2] Langson et al. „Robust model predictive control using tubes“. In: *Automatica*. 2004.
- [3] J. Köhler et al. „A computationally efficient robust model predictive control framework for uncertain nonlinear systems“. In: *Arxiv.org*. 2019.
- [4] J. F. Fisac et al. „A general safety framework for learning-based control in uncertain robotic systems“. In: *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2018.
- [5] M. Althoff. „Reachability analysis and its application to the safety assessment of autonomous cars“. *Dissertation TU München*. 2010.

# Cyber-Security von vernetzten ereignisdiskreten Systemen

Raphael Fritz \*

Ping Zhang \*\*

\* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik  
TU Kaiserslautern  
Erwin-Schrödinger Str. 12, 67663 Kaiserslautern  
Tel. 0631 2054310  
Fax 0631 2054462  
fritzr@eit.uni-kl.de

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

**Schlüsselwörter:** Cyber-Security, Angriffsmodellierung, Angriffsdetektion, Steuerungsverschlüsselung, ereignisdiskrete Systeme, vernetzte Systeme

Im Zuge von IoT und Industrie 4.0 wird die Digitalisierung und Vernetzung von Anlagen in der Industrie immer weiter vorangetrieben. Dadurch werden komplexere Regelungs- und Steuerungskonzepte ermöglicht, aber es gehen auch neue Risiken damit einher. In den letzten Jahren kam es vermehrt zu Cyberangriffen auf industrielle Automatisierungssysteme, wie z.B. Stuxnet und Triton [1]. Diese Entwicklungen erfordern neue Konzepte um Automatisierungssysteme gegenüber Angreifern zu schützen. In diesem Beitrag werden Ansätze zur Handhabung von Cyberangriffen auf ereignisdiskrete Systeme vorgestellt.

Der Fokus in diesem Beitrag liegt auf komplexeren Angriffen, wie Replay und Covert Angriffen, die aktiv versuchen den Einfluss des Angriffs zu verschleiern und die Detektion mit konventionellen Methoden der Anomalieerkennung erschweren. Die Angriffe werden in diesem Beitrag auf Basis von signalinterpretierten Petrinetzen modelliert [2,3] und es werden Methoden zur Angriffsprävention [4] und Angriffsdetektion vorgestellt [2,3].

Die Angriffsprävention soll den Zugriff auf sensible Daten, wie Sensorsignale, Stellgrößen und Steuerungsparameter, verhindern und die für komplexere Angriffe notwendigen Informationen schützen. Dabei wird auf eine homomorphe Verschlüsselungsmethode zurückgegriffen, die es erlaubt mathematische Operationen auf verschlüsselte Daten anzuwenden. Es wird ein Verfahren zur Verschlüsselung einer Steuerung in Form eines signalinterpretierten Petrinetzes vorgestellt, das sowohl die Kommunikation zwischen Sensoren, Aktoren und der Steuerung, als auch die Steuerungsparameter und Systemzustände verschlüsselt [4].

Da eine Angriffsprävention den Zeitpunkt eines Angriffs hinauszögern, aber den eigentlichen Angriff nicht verhindern kann, ist der Einsatz von Detektionsmethoden im Zuge einer „Defense in Depth“ Strategie sinnvoll. Replay und Covert Angriffe sind unsichtbar für Detektionseinrichtungen, da sie das Normalverhalten der Anlage vortäuschen. Daher ist die Erkennung solcher Angriffe mit konventionellen Detektionsverfahren nur schwer möglich. Die vorgestellte Methode verändert mithilfe von Permutationsmatrizen die im Netzwerk übertragenen Ein- und Ausgangssignale und stört dadurch die Systemkenntnis des Angreifers [2]. Der Angreifer kann nicht auf das veränderte Ein- und Ausgangsverhalten des Systems reagieren und wird dadurch sichtbar. Dabei ist es wichtig, die Permutationsmatrizen so zu wählen, dass Angriffe

schnell detektiert, aber die Angriffe durch die Permutation der Signale nicht zusätzlich verstärkt werden.

### **Literatur:**

- [1] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. *Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2018*. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, 2018.
- [2] R. Fritz, P. Zhang. *Modeling and detection of cyber attacks on discrete event systems*. Proceedings of the 14th Workshop on Discrete Event Systems (WODES), pp. 296-301, Sorrento Coast, Italy, 2018.
- [3] R. Fritz, P. Schwarz, P. Zhang. *Modeling of Cyber Attacks and a Time Guard Detection for ICS based on Discrete Event Systems*. Proceedings of the 2019 European Control Conference (ECC), pp. 4368 - 4373, Naples, Italy, 2019.
- [4] R. Fritz, M. Fauser, P.Zhang. *Controller encryption for discrete event systems*. Proceedings of the 2019 American Control Conference (ACC), pp. 5633 - 5638, Philadelphia, USA, 2019.

# Efficient Solution of Distributed Mixed Integer Programming in Control of Networked Systems

Zonglin Liu, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Olaf Stursberg

FG Regelungs- und Systemtheorie  
FB Elektrotechnik/Informatik  
Universität Kassel

Wilhelmshöher Allee 73, 34121 Kassel

Z.Liu@uni-kassel.de  
+49 - (0)561 - 804 - 6495

stursberg@uni-kassel.de  
+49 - (0)561 - 804 - 6367

**Keywords:** Distributed control, optimization, mixed-integer programming, networked systems, hybrid systems.

In optimization-based control of networked systems, the system size often implies the use of distributed computational approaches. If, in addition, the problem formulation involves logic constraints, the problem class of distributed mixed integer programming (MIP) arises naturally. Logic conditions may stem from hybrid dynamics (e.g. the assignment of different dynamics to different regions of the state space [1, 2]), or from the modeling of resource constraints involving integer variables [3]. Fig. 1 shows the example of a coordinated multi-vehicle driving scenario, in which a building site imposes a non-convexity on the road area available for driving, and a constraint involving binary variables encodes that only one car can enter a narrow passage at a time. Partitioning the road into several convex regions and formulating the logic constraint leads to a MIP problem, which can be solved in centralized or distributed fashion.

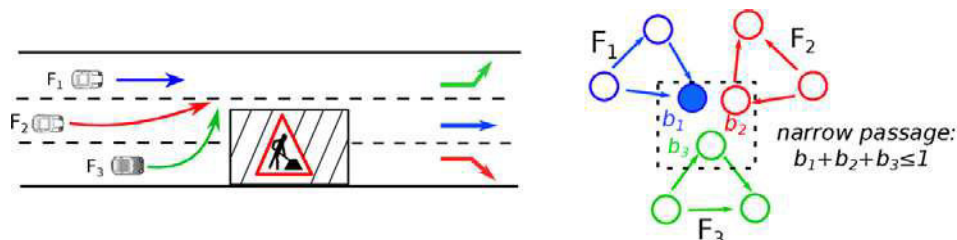


Figure 1: The local controllers of autonomous vehicles on a three-lane road have to ensure that a narrow passage is entered only by one car at a time. This is modeled by a coupling constraint involving binary variables  $b_i$ .

While the centralized solution may appear most promising with respect to the satisfaction of the coupling constraints, the computational effort is often prohibitively high, since MIP problems belong to the class NP-hard, i.e., the effort of solution increases exponentially for growing numbers of subsystems. If distributed approaches are used for optimal control of networked systems not involving integer variables, e.g. large linear programming (LP) problems, typical distributed solution schemes often follow the principle of first dualizing the coupling constraints to transfer the constraints into the objective function, making use of the fact that no duality gap exists [4]. Then, the dualized problem is decomposed into a set of local problems of reduced size for any subsystem, and these local problems are solved sequentially or in parallel. This approach guarantees the global optimality of the distributed solution due to the convexity of the problem [5]. However, for large non-convex MIP problems, for

which a duality gap exists, the same approach may cause the distributed solution to be non-optimal or even infeasible.

This work proposes an approach to obtain for the latter class of problems typically within a relatively small number of iterations a solution that is close to the globally optimal one. This approach is based on different versions of necessary optimality conditions for the distributed solution to the MIP problem. These conditions are inspired by the Karush-Kuhn-Tucker optimality conditions for the convex case. The distributed solution of the MIP problem is carried out sequentially by employing different stages, each of which stems from one of the necessary optimality condition to guide the decomposition and the solution process. In addition to significantly reducing the computational effort for many problem instances, the contribution shows that the feasibility of candidates generated over the iterations is ensured, as well as a continuous reduction of the global costs over the iterations is obtained. The approach moves from one stage to the next if the associated necessary optimality conditions is satisfied, leading typically to moderate optimality gaps upon termination, when no better candidate is found in any stage. This observation, as well as a significant reduction of the computation time compared to centralized approaches, is demonstrated by a larger number of numerical experiments, which are summarized at the end of the presentation.

## Literature

- [1] Z. Liu and O. Stursberg. "Optimal Trajectory Planning of Hybrid Systems by Efficient MIQP Encoding." In: *IEEE Conference on Decision and Control*, 2018, p. 1548-1553.
- [2] Z. Liu and O. Stursberg. "Efficient Optimal Control of Hybrid Systems with Conditioned Transitions." In: *IEEE Int. Conference on Control and Automation*, 2019, p. 223-230.
- [3] Z. Liu and O. Stursberg. "Distributed Control of Networked Systems with Coupling Constraints." In: *at – Automatisierungstechnik*, Vol. 67(12), 2019, p. 1007-1018.
- [4] D. Palomar and M. Chiang. "A Tutorial on Decomposition Methods for Network Utility Maximization". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 24(8), 2006, p.1439-1451.
- [5] D. Bertsekas and J. Tsitsiklis. "Parallel and distributed computation: numerical methods". Prentice Hall, 1989.



# Fehlertolerante Steuerung vernetzter Regelungssysteme mit flexibler Aufgabenverteilung

Kai Schenk

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik  
und Prozessinformatik  
Ruhr-Universität Bochum  
schenk@atp.rub.de

Jan Lunze

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik  
und Prozessinformatik  
Ruhr-Universität Bochum  
lunze@atp.rub.de

**Schlüsselwörter:** Vernetzte Systeme, kooperative Regelung, fehlertolerante Regelung, Trajektorienregelung, schaltende Systeme.

Die fehlertolerante Steuerung von vernetzten Systemen bietet ein wirksames Mittel, um sicherheitskritische Situationen zu vermeiden und die Verfügbarkeit des Gesamtsystems zu erhöhen. In diesem Vortrag werden vernetzte Regelungssysteme betrachtet, bei denen die Teilsysteme eine gemeinsame Aufgabe erfüllen müssen. Bei diesen Systemen kann Fehlertoleranz im Gesamtsystem dadurch erreicht werden, dass die Teilaufgaben im Fehlerfall umverteilt werden [1]. Der vorgestellte Ansatz unterscheidet sich signifikant von Ansätzen in der Literatur, bei denen versucht wird, die Funktion des defekten Teilsystems wiederherzustellen, wofür redundante Komponenten in jedem der Teilsysteme vorhanden sein müssen.

Vernetzte Regelungssysteme bestehen aus Teilsystemen, die untereinander über ein digitales Kommunikationsnetzwerk Informationen austauschen und zusätzlich durch feste physikalische Kopplungen miteinander verbunden sein können [2]. Derartige Strukturen entstehen, sobald die Komplexität des untersuchten Prozesses ein bestimmtes Maß übersteigt, und finden sich in zahlreichen Anwendungen wie dem intelligenten Stromnetz, beim autonomen Fahren oder in der „Industrie 4.0“ wieder.

In diesem Vortrag bestehen vernetzte Regelungssysteme (siehe Abb. 1) aus lokalen Regelkreisen  $P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*$ , in denen lokale Regler  $C_1^*, C_2^*, \dots, C_N^*$  die Aufgabe haben, die zugehörigen Ausgänge  $y_1, y_2, \dots, y_N$  auf die gewünschten Referenztrajektorien  $y_1^*, y_2^*, \dots, y_N^*$  zu führen. Ein defektes Teilsystem ( $P_1$  in Abb. 1) kann seine nominelle Aufgabe nicht mehr erfüllen und soll durch benachbarte fehlerfreie Systeme unterstützt werden.

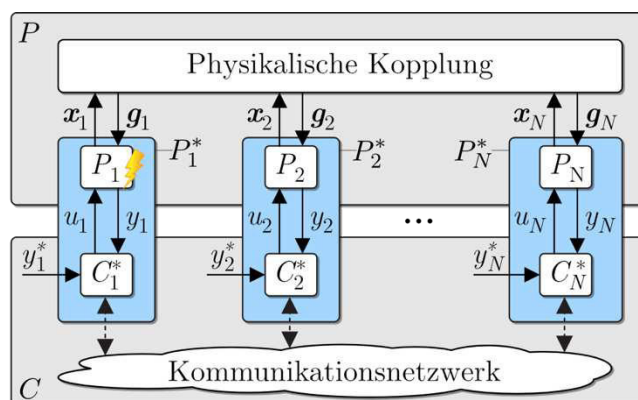
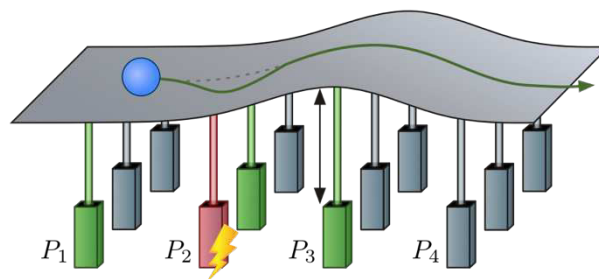


Abbildung 1: Struktur vernetzter Regelungssysteme.

Es wird ein globaler Performanceausgang eingeführt, der von den Messgrößen der Teilsysteme abhängt. Die Aufgabe des Gesamtsystems gilt dann als erfüllt, wenn der Performanceausgang einer vorher spezifizierten Trajektorie folgt. Die vorgestellte Methode der flexiblen Aufgabenverteilung zerlegt die gemeinsame Aufgabe in Teilaufgaben, die den einzelnen Teilsystemen zugewiesen werden. Im Fehlerfall, in dem ein Teilsystem defekt ist und seine nominelle Aufgabe nicht mehr erfüllen kann, werden Teilaufgaben umverteilt, um weiterhin die Sicherstellung der gemeinsamen Aufgabe zu gewährleisten. Hierbei besteht in der untersuchten Systemklasse die zusätzliche Schwierigkeit darin, dass die Teilsysteme nicht zu jeder Zeit in der Lage sind, den Performanceausgang zu beeinflussen, wodurch das Gesamtsystem einen schaltenden Charakter aufweist.

Eine für vernetzte Regelungssysteme charakteristische Eigenschaft ist die größtmögliche Autonomie der Teilsysteme, die bei der Aufgabenverteilung beachtet werden muss [3]. Gleichzeitig muss die Aufgabe, die einem Teilsystem zugewiesen wird, auch durch eine passende Steuerung umsetzbar sein [4, 5]. Das bedeutet für den hier betrachteten Fall der Trajektorienfolge, dass die Teilaufgaben  $y_1^*, y_2^*, \dots, y_N^*$  hinreichend oft differenzierbare Trajektorien beschreiben und zudem konsistent zu den Anfangsbedingungen der Teilsysteme sowie passend zum defekten Teilsystem gewählt sind.

Als fortlaufendes Beispiel wird während des Vortrags das in Abb. 2 gezeigte Transportsystem genutzt. Die Linearmotoren, die unterschiedliche Oberflächenformen erzeugen, sollen die Kugel entlang der in blau dargestellten Trajektorie bewegen. Der angesprochene Aspekt des Schaltens entsteht, weil die Kugel nur von den unmittelbar in der Nähe befindlichen Linearmotoren beschleunigt werden kann. Die vorgestellte Methode der flexiblen Aufgabenverteilung weist jedem Motor eine Solltrajektorie zu, die so gewählt ist, dass die Motoren die Oberfläche so verformen, dass die Kugel wie gewünscht bewegt wird. Sobald einer der Motoren fehlerhaft arbeitet, werden die bisherigen Aufgaben umverteilt, um die Kugel weiterhin zum Ziel zu befördern.



**Abbildung 2:** Beispiel für kooperierende Teilsysteme.

## Literatur

- [1] K. Schenk, B. Gülbitti und J. Lunze. „Cooperative fault-tolerant control of networked control systems“. In: *Proc. of 10th Symposium on Fault Detection, Supervisory and Safety for Technical Processes (SAFEPRO-CESS'18)*. 2018.
- [2] J. Lunze. „*Networked Control of Multi-Agent Systems*“. Bookmundo Direct. 2019.
- [3] K. Schenk und J. Lunze. „Fault tolerance in networked systems through flexible task assignment“. In: *Proc. of 4th Conference on Control and Fault Tolerant Systems (SysTol'19)*. 2019.
- [4] K. Schenk und J. Lunze. „Tracking control of networked and interconnected systems“. In: *Proc. of 7th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems (NecSys'18)*. 2018.
- [5] K. Schenk, M. Wissing und J. Lunze. „Trajectory tracking in networks of linear systems“. In: *Automatica* (eingereicht).

# Integritätsbestimmung eines satellitenbasierten Multisensor-Navigationssystems

Shuchen Liu

Institut für Regelungstechnik  
RWTH Aachen  
s.liu@irt.rwth-aachen.de

Dirk Abel

Institut für Regelungstechnik  
RWTH Aachen  
d.abel@irt.rwth-aachen.de

**Schlüsselwörter:** GNSS, Satellitennavigation, Multisensor-Navigationssystem, Integritätsüberwachung, Fehlererkennung und -identifikation,

Autonome Fahrzeuge müssen kollisionsfreie Trajektorien berechnen und denen folgen können. Dazu muss neben der Umgebungserkennung der Fahrzeugzustand, z. B. Position, Geschwindigkeit und Orientierung bekannt sein bzw. aus Sensordaten geschätzt werden. Da ein autonomes System keinerlei Kontrolle durch einen Menschen unterliegt, müssen Fahrzeugregelung und Zustandsschätzung robust gegenüber Störungen sein und ein hohes Maß an Integrität bereitstellen.

Stand der Technik bei der Zustandsschätzung ist eine Integration von Signalbeobachtungen des globalen Navigations-Satelliten-Systems (GNSS) und inertialen Messdaten (IMU) in einem rekursiven Filter. Je nach Anwendung können weitere Sensoren integriert werden, um entweder die Schätzgenauigkeit zu erhöhen, oder die Robustheit zu verbessern. Einen solchen Filter kann man als Multisensor-Navigationssystem bezeichnen.

Das Multisensor-Navigationssystem kann durch verschiedene Messfehler gestört werden. Die satellitenbasierten Navigationssysteme werden in der Regel von Signalstörungen beeinflusst, zu diesen gehören Satellitenuhrenfehler, Mehrwegeeffekte, keine direkt Sichtverbindung (NLOS), Jamming und Spoofing [1]. Darüber hinaus können Fehler in den Daten der Onboard-Sensorik auftreten. Beispiele hierfür sind Nullmessungen oder sich wiederholende Messungen der IMU.

Wenn die Fehlerquellen nicht erkannt und ausgeschlossen werden, führt dies zu einer fehlerhaften Zustandsschätzung und gefährdet die Genauigkeit des gesamten Navigationssystems. Daher ist in sicherheitsrelevanten Anwendungen die Integrität der Sensormessungen und der Navigationslösung unbedingt notwendig. Fehlerhafte Messungen können erkannt und identifiziert werden, indem die Konsistenz der Messungen überprüft wird, was eine Messredundanz erfordert. Anschließend wird die Integrität der Navigationslösung durch die geschätzte Qualität aller Messungen bestimmt.

In der vorliegenden Arbeit wird ein enggekoppeltes Navigationsfilter verwendet, welches GNSS-Beobachtungen, IMU und Doppler-Velocity-Log (DVL) fusioniert. Auf dessen Basis ist ein Konzept des Integritätssystems für das satellitenbasierte Multisensor-Navigationssystem umgesetzt. In einer Datenvorverarbeitungsphase werden die Daten jedes einzelnen Sensors unabhängig voneinander geprüft. Bei IMU und DVL wird zunächst die Plausibilität der Messungen geprüft.

Zur Integritätsüberwachung der GNSS-Messungen wird eine hybride Strategie verwendet [2]. Diese besteht aus der konventionellen Paritäts-basierten Receiver Autonomous Integrity

Monitoring (RAIM) Methode und der innovativen Robust Set Inversion via Interval Analysis (RSIVIA) Methode, bei der durch Mengeninvertierung der GNSS-Messungen auf den Navigationszustand geschlossen wird. Beide Methoden werden in eine Heuristik eingebettet, die hochfrequente Änderungen der Satellitenkonstellation ausschließt [3] und damit das Konvergenzverhalten des Navigationsfilters unterstützt.

Darüber hinaus wird die Konsistenz von IMU- und DVL-Messungen mittels eines Filterbankansatzes zur Fehlererkennung geprüft. Bei diesem Ansatz wird eine Bank von parallellaufenden Filtern konstruiert [4]. Jedes dieser unterlagerten Filter wird für einen bestimmten Sensorfehler entworfen. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Fehlerfall zutreffend ist, wird durch die geschätzten Zustände, Messresiduen und deren Kovarianz ermittelt. Die Integrität der Gesamtnavigationslösung ist letztendlich die kombinierte Wahrscheinlichkeit der Zustandsschätzung aller unterlagerten Filter.

Die GNSS-Integritätsüberwachung wurde in Bezug auf die Richtigkeit der Fehlererkennung und -identifikation (FDI) und Genauigkeitsverbesserung der Navigationslösung mittels Fehlerausschluss validiert. Die FDI-Funktionalität konnte mit Hilfe aufgezeichneter Daten der Galileo-Testumgebung (GATE) in Berchtesgaden nachgewiesen werden. In diesem Testgebiet wurden bis zu sechs Galileo-Satelliten im Überflug emuliert und deren Signale künstlich verfälscht. Ein Referenzsystem diente als Ground-Truth. Die Ergebnisse zeigten, dass die fehlerhaften Messungen durch das vorgestellte Integritätssystem richtig identifiziert wurden und sich dadurch die Genauigkeit der Navigationslösung deutlich verbesserte.

Der Filterbankansatz zur Identifikation von fehlerhaften Messungen der Onboard-Sensoren wurde durch einen maritimen Datensatz validiert. Sensormessfehler wurden dazu simulativ generiert. Der Filterbankansatz konnte diese Fehler erfolgreich identifizieren und dadurch die Robustheit der Gesamtnavigationslösung erhöht werden.

## Literatur

- [1] U. I. Bhatti und W. Y. Ochieng, „Failure Modes and Models for Integrated GPS/INS Systems,“ *Journal of Navigation*, Bd. 60, Nr. 2, p. 327–348, 2007.
- [2] S. Liu, J.-J. Gehrt, D. Abel and R. Zweigel, "Integrity of Dual-Constellation aided Navigation Filter in Safety-Critical Maritime Applications," *Proceedings of Integrated Ship's Information Systems & Marine Traffic Engineering Conference*, 2019.
- [3] S. Liu, J.-J. Gehrt, D. Abel und R. Zweigel, „Dual-constellation aided high accuracy and high integrity navigation filter for maritime applications,“ *Proceeding of the 2019 International Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION ITM 2019)*, pp. 762-774, 2019.
- [4] J. Wendel, *Integrierte Navigationssysteme: Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation*, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2009.

# Effiziente Gaußprozess-Regression zur Modellierung und Kompensation von unbekanntem Einflussfaktoren

Jan Graßhoff

Institut für Medizinische Elektrotechnik  
Universität zu Lübeck  
j.grasshoff@uni-luebeck.de

Philipp Rostalski

Institut für Medizinische Elektrotechnik  
Universität zu Lübeck  
philipp.rostalski@uni-luebeck.de

**Schlüsselwörter:** Lernende Regelung, Gaußprozesse, Latent Force Modell, Störgrößenkompensation

Die parametrische Modellbildung stößt in komplexen Systemen häufig an Grenzen, da nicht alle Modellteile/Einflussfaktoren hinreichend genau basierend auf physikalische Grundprinzipien hergeleitet werden können. Rein datengetriebene Methoden haben hingegen das Problem, dass meist große Datenmengen benötigt werden, um ein gutes Modell zu erlernen. In diesem Beitrag werden daher datenbasierte Methoden mit klassischen physikalischen Modellen kombiniert. Durch diesen hybriden Ansatz können unbekannte Modellteile erlernt werden, selbst wenn nur kleine Datenmengen zur Verfügung stehen.

Als datenbasiertes Verfahren bieten sich Gaußprozesse (GPs) an, welche im Gegensatz zu anderen Lernverfahren eine direkte Einbeziehung von Vorwissen ermöglichen [1]. So können zum Beispiel Vorannahmen über die Glattheit oder Periodizität des zu Grunde liegenden Prozesses durch Wahl einer geeigneten Kovarianzfunktion eingebracht werden. Im Gegensatz zu nicht-Bayes'schen Lernverfahren, bieten Gaußprozesse außerdem den Vorteil, dass die Prädiktionsunsicherheit quantifiziert werden kann. In diesem Vortrag soll eine spezielle Klasse von Modellen untersucht werden, welche einen auf ein System wirkenden unbekanntem Einflussfaktor als GP-Verteilung modellieren. Das System selbst wird dabei als bekannt vorausgesetzt (gegeben durch physikalische Modellbildung oder ermittelt durch Systemidentifikation). Diese Modellstruktur wird auch als Latent Force Modell (LFM) bezeichnet [2, 3].

Die klassische Lösung der GP-Regression ist für die Lösung dieser Aufgabe aufgrund ihres hohen Speicher- und Rechenbedarfs nur bedingt geeignet. In der Literatur wurden verschiedene Ansätze vorgeschlagen, um mit diesen Limitationen umzugehen. Unter anderem konnte gezeigt werden, dass temporale GPs in (teils hochdimensionale) äquivalente Zustandsraummodelle überführt werden können [4]. Die Inferenz kann somit effizient in linearer Laufzeit mittels Kalman Filter und Smoother Methoden gelöst werden.

In diesem Beitrag wird ein Vorgehen vorgeschlagen, bei dem diese Reformulierung in Zustandsraumdarstellung verwendet wird, um die modellprädiktive Regelung von LFM's effizient umzusetzen [5]. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Einbeziehung von Unsicherheiten in den Reglerentwurf. Das GP Modell wird verwendet um die Unsicherheiten, die durch den unbekanntem Einflussfaktor entstehen, über den Prädiktionshorizont zu propagieren. Nebenbedingungen an Zustands- und Ausgangsgrößen können so probabilistisch formuliert und berücksichtigt werden. Eine wichtige Anwendung für die betrachteten Modelle ist die Störgrößenkompensation – der GP wird hierbei verwendet um eine unbekanntem (z.B. periodische) Störgröße zu schätzen und damit kompensieren zu können. Die Störgröße wird dabei zum

Beispiel durch entsprechende periodische oder quasi-periodische Kovarianzfunktionen modelliert.

Als konkretes praktisches Anwendungsbeispiel zur Veranschaulichung dieses Ansatzes wird hier die Schätzung von (periodischer) Atemaktivität während der künstlichen Beatmung diskutiert. Die unbekannte Eigenatmung wird hierbei als Latent Force über ein periodischen GP modelliert und mit einem einfachen Lungenmodell kombiniert. Die Atemaktivität kann somit nicht-invasiv anhand der üblichen Beatmungskurven ermittelt und in der Regelung berücksichtigt werden.

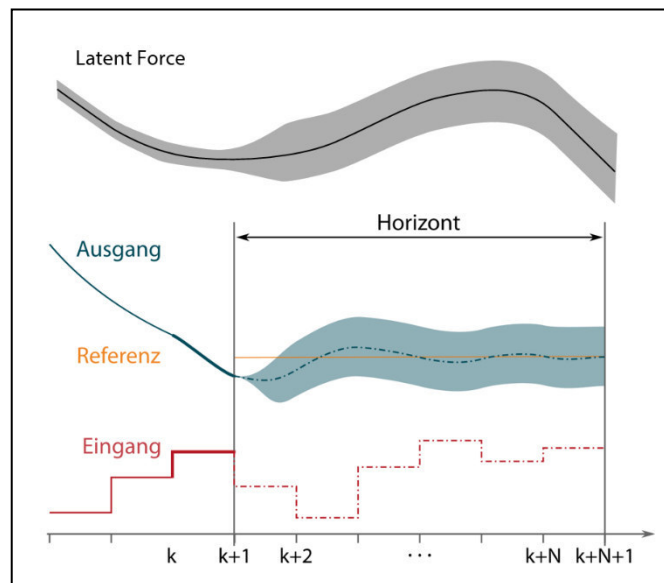


Abbildung 1: Darstellung der stochastischen modellprädiktiven Regelung unter Unsicherheiten.

## Literatur

- [1] C. E. Rasmussen and C. K. I. Williams. *Gaussian Processes for Machine Learning (Adaptive Computation and Machine Learning)*. The MIT Press, 2005.
- [2] M. Álvarez, D. Luengo, and N. D. Lawrence. Latent force models. In D. van Dyk and M. Welling, editors, *Proceedings of the Twelfth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, volume 5 of Proceedings of Machine Learning Research*, pages 9–16, Hilton Clearwater Beach Resort, Clearwater Beach, Florida USA, 16–18 Apr 2009. PMLR.
- [3] S. Särkkä, M. A. Álvarez, and N. D. Lawrence. Gaussian process latent force models for learning and stochastic control of physical systems. *CoRR*, abs/1709.05409, 2017.
- [4] J. Hartikainen and S. Särkkä. Kalman filtering and smoothing solutions to temporal gaussian process regression models. *2010 IEEE International Workshop on Machine Learning for Signal Processing*, pages 379–384, 2010.
- [5] J. Graßhoff, G. Männel, H. Abbas and P. Rostalski. Model Predictive Control using Efficient Gaussian Processes for Unknown Disturbance Inputs. *In 58th IEEE Conference on Decision and Control*, Dec 2019.

# Flacheits-basierende diskrete Regelung eines Batterieemulators für Lasten mit konstanter Leistungsaufnahme

Stefan Jakubek

Institut für Mechanik und Mechatronik  
Forschungsbereich Regelungstechnik und  
Prozessautomatisierung  
Technische Universität Wien  
stefan.jakubek@tuwien.ac.at

Michael Zauner

Institut für Mechanik und Mechatronik  
Forschungsbereich Regelungstechnik und  
Prozessautomatisierung  
Technische Universität Wien  
michael.zauner@tuwien.ac.at

**Schlüsselwörter:** nichtlineare Regelung, differentielle Flachheit, zeitliche Diskretisierung, Batterieemulator

Die Elektrifizierung des Antriebstrangs von Fahrzeugen ist ein Forschungsthema das in letzter Zeit viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen hat. Mit dem verstärkten Aufkommen von hybriden bzw. vollelektrischen Fahrzeugen kam auch eine verstärkte Nachfrage an Prüfständen für leistungselektronische Fahrzeugkomponenten, Motoren und Batterien, [1]. Um bei der Entwicklung neuer Komponenten Zeit und Geld zu sparen, werden diese gerne in „power hardware-in-the-loop“ Umgebungen getestet. Hierbei wird ein Großteil des Fahrzeuges virtuell emuliert um realistische Belastungen für die zu prüfenden Komponenten zu erzeugen. Speziell werden gerne Batterien emuliert, da sowohl der Umgang mit ihnen umständlich ist (Batterien müssen vorgeladen sowie vorkonditioniert werden), als auch ihre Lebensdauer beschränkt ist, und diese eine Brandgefahr darstellen.

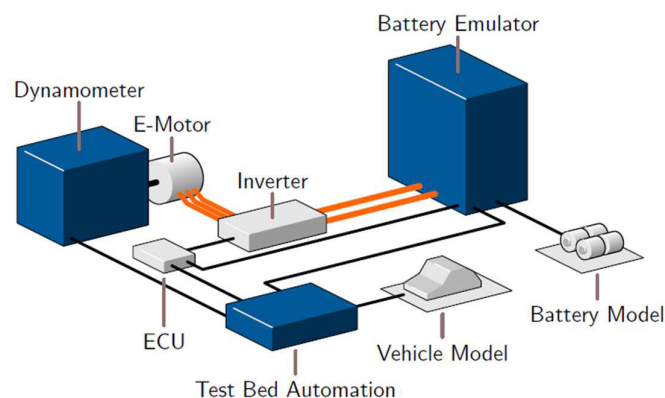


Abbildung 1: Hardware-in-the-loop Aufbau mit Batterieemulator

Derartige Batterieemulatoren werden gerne als bidirektionale step-down Convertern ausgeführt. Für den Batterieemulator verhält sich ein geregelter nachgeschalteter Motor als Last mit konstanter Leistungsaufnahme (constant power load - CPL). Dieses nichtlineare Verhalten verursacht eine instabile Systemdynamik welche, gekoppelt mit den diskreten Schaltern im Converter, es schwierig macht eine geeignete Regelungsstrategie zu entwerfen, [2]. Normalerweise wird die Schaltfrequenz im Converter als schnell genug im Vergleich zur Systemdynamik angenommen, um sie zu vernachlässigen. Wenn aber die gewünschte Systemdynamik sich an die Schaltfrequenz annähert, kann diese Vereinfachung nicht mehr getroffen werden.

Um dennoch schnellere Systemdynamiken zu erreichen werden Regelungskonzepte benötigt die geeignete stückweise konstante Stellgrößen liefern. Bei nichtlinearen Systemen ist eine zeitliche Diskretisierung der beschreibenden Differentialgleichungen nicht immer exakt möglich, wodurch Näherungen verwendet werden müssen.

In diesem Vortrag wird ein neuartiger Ansatz präsentiert, um einen diskreten Regler für ein differentiell flaches System zu entwerfen. Dabei wird die Eigenschaft der differentiellen Flachheit genutzt, um mithilfe eines linearisierten Systems einen Stellgrößenverlauf zu generieren, welcher stückweise konstant ist.

## Literatur

- [1] O. König, C. Hametner, G. Prochart, und S. Jakubek, "Battery emulation for power-hil using local Model networks and robust impedance control," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 2, pp. 943–955, Feb 2014.
- [2] M. K. AL-Nussairi, R. Bayindir, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, und P. Siano, "Constant power loads (cpl) with microgrids: Problem definition, stability analysis and compensation techniques," Energies, vol. 10, no. 10, p. 1656, Oct 2017.



# Dynamical Processes on Social Networks: Modeling, Analysis, and Control

Fangzhou Liu

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik  
Technische Universität München  
fangzhou.liu@tum.de

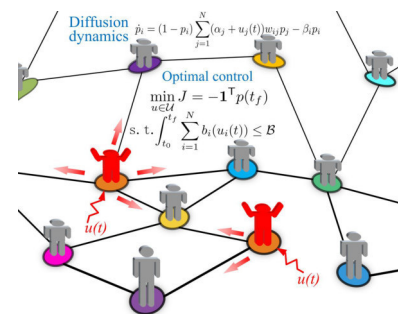
Martin Buss

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik  
Technische Universität München  
mb@tum.de

**Key words:** social networks, information epidemics, opinion dynamics

Dynamical processes on social networks draw enormous attention for researchers from multitudes of fields. In this work, we aim to build a bridge between control theory and social networks by providing mathematical tools for modeling, analysis, and control. Specifically, we focus on two representative dynamical processes on social networks: information diffusion and opinion dynamics.

By analogy, the information diffusion process is modeled as epidemic spreading, which is then termed as information epidemics. In particular, by using the mean-field approximation, we introduce the node-based models, which characterize the heterogeneities in the communication topology and individual transition rates. Apart from the modeling, the existence, uniqueness, and stability of the disease-free and endemic equilibria are analyzed by using the properties of Metzler matrices. Additionally, the control problems of the information epidemics are inspected, especially the optimal control design such that the information spreads in a desired manner.



Following the diffusion process, the opinion dynamics are studied in light of the social influence. Opinion dynamics on social networks with coopetitive (cooperative-competitive) interactions may result in polarity, consensus or neutrality under different opinion protocols. The antecedent of protocol design is to study the accessibility problem: whether or not there exist admissible control rules to polarize, consensus, or neutralize individual opinions in a large population. From an operational perspective, we investigate the polarizability, consensusability, and neutralizability of opinion dynamics in question. Particular emphasis is on the joint impact of individual dynamical properties and their social ties. Sufficient and/or necessary conditions for these accessibility problems are provided by using powerful tools from spectral analysis and algebraic graph theory.

## Literatur

- [1] F. Liu und M. Buss. „Optimal Control for Heterogeneous Node-Based Information Epidemics over Social Networks“. In: *IEEE Transactions on Control of Network Systems*. 2019.
- [2] F. Liu et al. „Polarizability, Consensusability and Neutralizability of Opinion Dynamics in Coopetitive Social Networks“. In: *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2019.
- [3] F. Liu et al. „Robust Optimal Control of Deterministic Information Epidemics with Noisy Transition Rates“. In: *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 2019.

# MPC unterstütztes EMS für vernetzte HES

S. Schwarz

Institut für Automatisierungstechnik  
TU Bergakademie Freiberg  
Sebastian.Schwarz@aut.tu-freiberg.de

Prof. Dr.-Ing. A. Rehkopf

Institut für Automatisierungstechnik  
TU Bergakademie Freiberg  
Andreas.Rehkopf@aut.tu-freiberg.de

**Schlüsselwörter:** MPC, EMS (Energy Management System), HES (Hybrid Energy System)

Die mit der Energiewende verbundene Dezentralisierung in Form von teilweise privaten Erzeugersystemen bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten und Herausforderungen. Dabei kommt Systemen auf Basis von KWK-Anlagen aufgrund der internen Sektorenkopplung eine wichtige Rolle zu [1]. Neben der internen Kopplung muss auch die Interaktion mit dem übergeordneten Netz berücksichtigt werden [2].

Im Rahmen dieses Beitrags wird auf Basis eines modellprädiktiven Ansatzes für ein einzelnes Energiesystem [3], [4], bestehend aus MBHKW, Pufferspeicher, Batterie, Heizpatrone, Photovoltaik-, Windkraft- und Solarthermieanlage, ein Ansatz für den

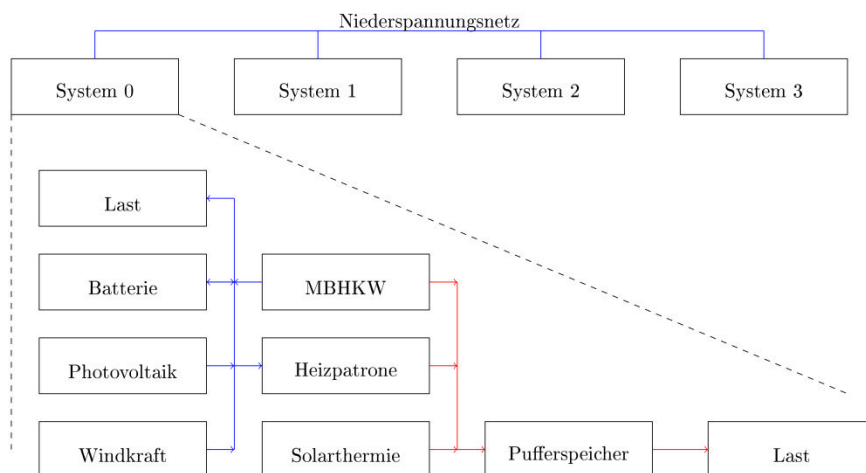


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Netzes hybrider Energiesysteme (elektrische Energieflüsse blau, thermische Energieflüsse rot)

vernetzten Betrieb mehrerer solcher Systeme betrachtet. Das Netz kann schematisch entsprechend Abbildung 1 dargestellt werden. Auf Basis einer diskreten Zustandsmodellierung für jedes einzelne System wird ein Prädiktionsmodell für das Netz erstellt. Das Gütemaß für die anschließende Bestimmung einer optimalen Steuertrajektorie  $U(k)$  für das Netz bildet die quadratische Abweichung von einer vorgegebenen Referenztrajektorie.

$$J(k) = U(k)^T H U(k) + E U(k)$$

Die technischen Randbedingungen der einzelnen Systeme und die Grenzen für die netzgebundene Interaktion finden in Form von Nebenbedingungen an das zu lösende Optimierungsproblem Berücksichtigung. Das Optimalregelproblem ergibt sich somit als

$$\begin{aligned} \min_{U(k)} J(k) \\ MU(k) \leq \gamma \end{aligned}$$

mit  $M \in \mathbb{R}^{n \times m}$  und  $\gamma \in \mathbb{R}^m$ .

$U(k)$  beinhaltet dann die optimalen Steuertrajektorien für die einzelnen Systeme unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der Vernetzung, was in dem Vortrag ausführlicher vorgestellt wird.

## Literatur

- [1] Ch. Müller; I. Skaff; A. Rehkopf: „Simulation und automatisierungstechnische Optimierung eines virtuellen Kraftwerks auf Basis der KWK-Technologie“. *EnEff-Forum*. 24.05.2015
- [2] Ch. Müller; A. Rehkopf: „Optimale Betriebsführung eines virtuellen Kraftwerks auf Basis von gasbetriebenen Mikro-Blockheizkraftwerken“. In: *at Automatisierungstechnik*. Band 59, Heft 3: S. 180-186, 2011.
- [3] S. Schwarz; A. Rehkopf: „Modellprädiktive Regelung hybrider Energiesysteme“. In T. Meurer et al: *Tagungsband GMA-Fachausschuss 1.40*, S. 186-195, 2018.
- [4] Yan Zhang et al: „Optimal operation of a smart residential microgrid based on model predictive control by considering uncertainties and storage impacts“. In: *ELSEVIER Solar Energy*. Band 122: S. 1052-1065, 2015.

# Ein geschwindigkeitsbasierter Störbeobachter zur Verbesserung einer Exoskelettregelung in der Rehabilitation

Fabian Just

Sensory-Motor Systems Lab  
ETH Zürich  
Universitätsklinik Balgrist  
Universität Zürich  
[fabian.just@hest.ethz.ch](mailto:fabian.just@hest.ethz.ch)

Robert Riener

Sensory-Motor Systems Lab  
ETH Zürich  
Universitätsklinik Balgrist  
Universität Zürich  
[robert.riener@hest.ethz.ch](mailto:robert.riener@hest.ethz.ch)

**Schlüsselwörter:** Störbeobachter, Exoskelett, Transparenz, physikalische Mensch-Roboter Interaktion, Rehabilitationsrobotik

Ungewollte Kräfte limitieren die Qualität der physikalischen Mensch-Roboter Interaktionen (pHRI) mit Rehabilitationsrobotern. Diese ungewollten Kräfte können durch verbesserte Mechanik, Sensorik, Kinematik und Regelungskonzepte minimiert und so die mechanische Transparenz des Exosketts erhöht werden. In diesem Beitrag wurde das Armexoskelett ARMin verwendet (Abbildung 1), um einen Störbeobachter mit einer konventionellen, modellbasierten Vorwärtssteuerung in einer Studie zu vergleichen.

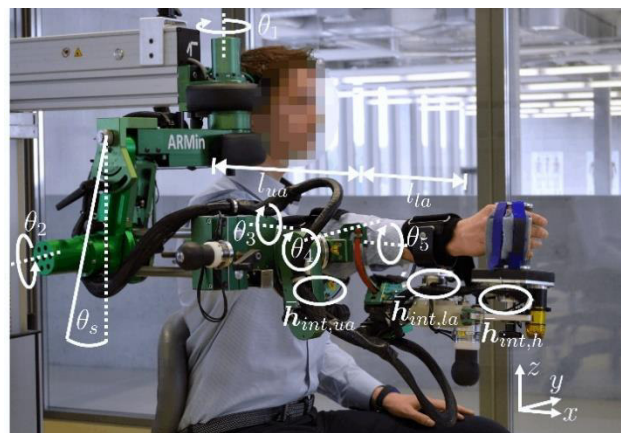


Abbildung 1: Das Exoskelett ARMin mit seinen Gelenken  $\theta$  und Mensch-Roboter Interaktionspunkten  $h_{int}$ .

Die konventionelle Vorwärtssteuerung nutzt physikalische Modelle von Gravitation, Reibung, Feder- und Kabelementen [1]. Der neu implementierte geschwindigkeitsbasierte Störbeobachter [2] nutzt die Kraft-/Drehmomentsensorik an allen drei Mensch-Roboter Interaktionspunkten (Abbildung 2) zur Schätzung des Stördrehmoments  $\hat{\tau}_{stör}$ . Bei maximaler mechanischer Transparenz ( $\tau_{stör} - \hat{\tau}_{stör} = 0$ ) minimieren sich pHRI Interaktionsdrehmomente ( $\tau_{pHRI}$ ).

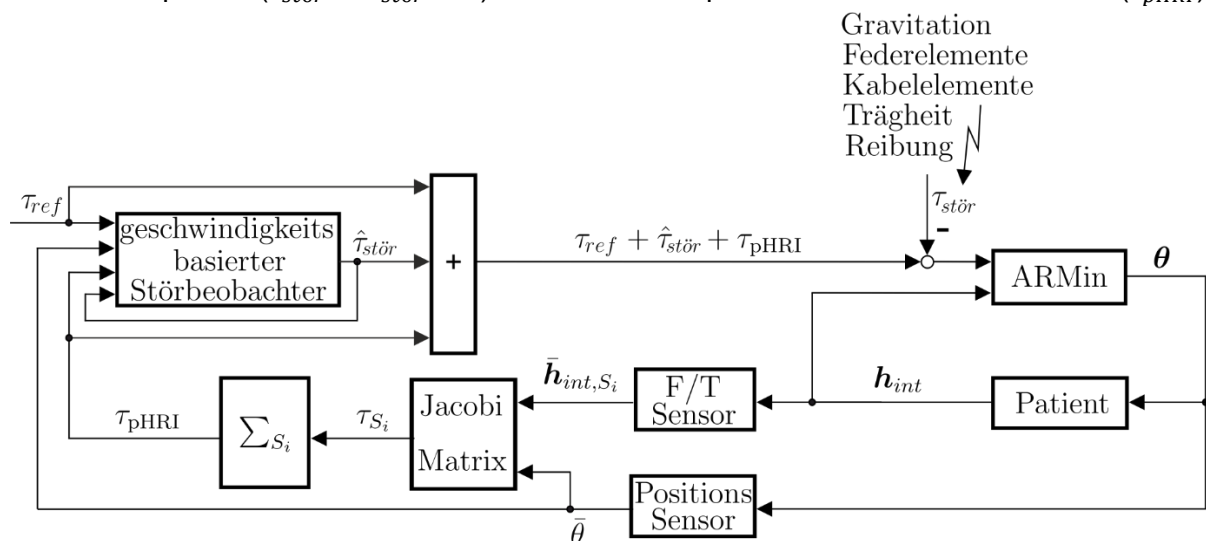


Abbildung 2: Regelkreis mit geschwindigkeitsbasiertem Störbeobachter und Exoskelett ARMin

In einer Studie mit  $n=20$  Teilnehmern bewegten sich die gesunden Probanden im Exoskelett jeweils mit zwei vorgegebenen Geschwindigkeiten (langsam, schnell) und jeweils ein Roboter-gelenk, während die anderen Gelenke mit Positionsreglern fixiert waren. Der primäre Zielparameter ist der Mittelwert des Interaktionsdrehmomentes in Achsenrichtung ( $\tau_{pHRI}$ ) über alle Wiederholungen ( $\tau_{m,pHRI}$ ), welcher durch die Summe aller Kraftsensordaten, je transformiert auf die Roboterachsen, mit ihrer zugehörigen Jacobi-Matrix berechnet wird,  $\tau_{pHRI} = \sum_{i=1}^3 \mathbf{J}_{int,S_i}^T \cdot \bar{\mathbf{h}}_{int,S_i}$ . Ziel des Reglers ist die Reduktion des Interaktionsdrehmoments auf Null.

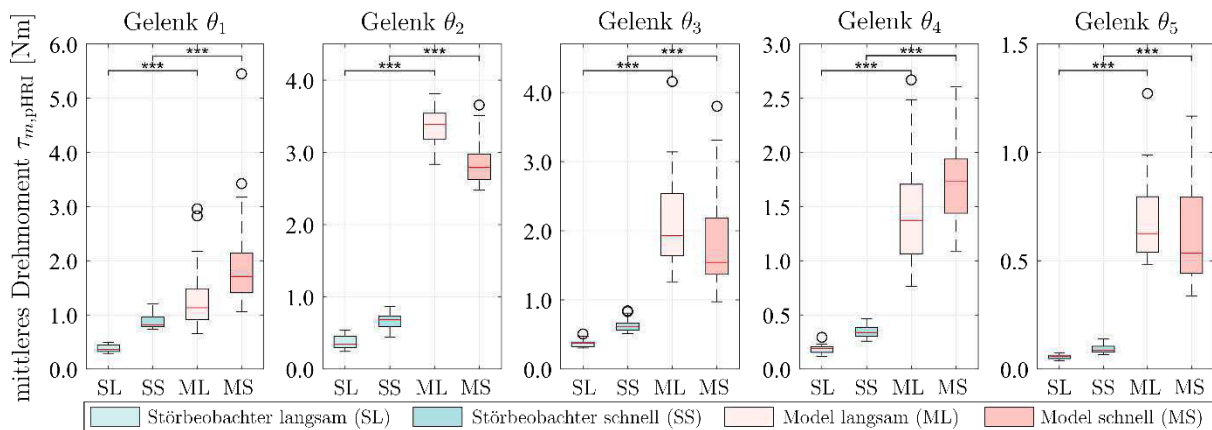


Abbildung 3: Vergleich der ungewollten Interaktionsdrehmomente zwischen Mensch und Roboter auf zwei Geschwindigkeitsstufen für die Vorwärtssteuerung und den Störbeobachter

Der Störbeobachter reduziert die ungewollten Drehmomente zwischen Mensch und Roboter auf jeder Achse und jeder getesteten Geschwindigkeit mit hoher Signifikanz ( $p < 0.001$ ). Die intersubjektive Variabilität der ungewollten Drehmomente bei der Nutzung des Störbeobachters ist deutlich kleiner als bei einer modelbasierten Regelung. Die hier gezeigten signifikanten Ergebnisse bei Einzelgelenkbewegungen konnten auch bei Mehrgelenkbewegungen erreicht werden [3].

Die systematische Analyse von geschwindigkeitsbasierten Transparenzeffekten in Einzelgelenk- und Multigelenkszenarien hebt die Vorteile des Störbeobachters hervor, welcher konsistentes Transparenzverhalten bei verschiedenen Geschwindigkeiten während Einzelgelenk- und Mehrgelenkbewegungen zeigte. Als Hauptresultat setzt das Konzept des Störbeobachters einen neuen Maßstab für Transparenz [3]. Die bessere Transparenz wurde folgend als Grundlage genutzt, um Armgewichtskompensationsmethoden für Schlaganfallpatienten zu entwickeln [4] und so den möglichen Arbeitsraum des Patientenarms während des Robotertrainings zu vergrößern.

## Literatur

- [1] F. Just et. al. „Online adaptive compensation of the ARMin rehabilitation robot“. In: *Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)*, 2016
- [2] A. Sabanovic und K. Ohnishi „Motion control systems“. In: *John Wiley & Sons*, 2011.
- [3] F. Just et. al. „Exoskeleton transparency: feed-forward compensation vs. disturbance observer“. In: *at-Automatisierungstechnik*. 2018
- [4] F. Just et. al. „Feedforward Model Based Arm Weight Compensation with the Rehabilitation Robot ARMin“. In: *Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, 2017

# Shared control for haptic human-robot interaction

Selma Music

Lehrstuhl für Informationstechnische Regelung

Technische Universität München

[selma.music@tum.de](mailto:selma.music@tum.de)

Sandra Hirche

Lehrstuhl für Informationstechnische Regelung

Technische Universität München

[hirche@tum.de](mailto:hirche@tum.de)

**Key words:** shared control, human-robot interaction, noninteracting control

The advances in the areas of cognitive science and human physiology, collaborative robots (cobots), and haptic interaction devices, enable the development of human-robot teams. Human-robot team interaction is highly relevant in many application domains, for example in collaborative manufacturing, search and rescue, and logistics. The reduction in price, size, and operational complexity has considerably increased the availability of robotic systems and their autonomous capabilities, while the advancements in communication technology allow a seamless information exchange. These developments are enablers for human-robot collaborative teams and their continuous interaction. One of the key research questions is how to combine human and robot team decision making and execution capabilities in order to accomplish a task and guarantee an intuitive interaction. For this purpose *control sharing* approaches determine in which way the human operator and the (semi-)autonomous system need to collaborate in order to accomplish a task [1]. In this talk we propose a generalized shared control approach with the focus on continuous haptic interaction between the human and the robot team.

The main control challenge of the interaction is its asymmetry, arising because robots may have a relatively high number of controllable degrees of freedom compared to the human operator, e.g. humanoid robots, swarms, and multi manipulators. Therefore, we propose a control scheme that establishes the interaction on spaces of reduced dimensionality taking into account the low number of human command and feedback signals imposed by haptic devices. These spaces are determined through the modeling of *subtasks*, necessary to accomplish a task, and represent a higher level of abstraction compared to the human and robot configuration spaces. Subtasks may be conducted either sequentially or simultaneously. In order to ensure the human operator does not generate undesired motions nor receives undesired feedback signals through the haptic devices, decoupling of simultaneous subtasks is necessary and is achieved through

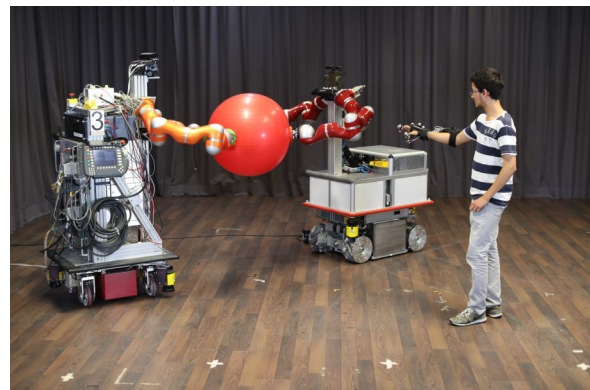


Figure 1: The human operator interacting with two mobile cooperative manipulators through wearable haptic devices

the control design [2]. In this way, multiple control goals can be achieved as well as *noninteraction* of the control loops, so that reference inputs of one control loop do not have undesired effects on states and outputs of the other control loops.

Our contribution is a *subtask-based shared control approach* that decouples the overall system into subsystems that describe the dynamics of *subtasks*. The approach is generalized to multiple subtasks for Euler-Lagrange dynamics. It is suitable for any type of robot system and is applicable on heterogeneous systems. Furthermore, passivity guarantees of the closed-loop system are shown. Passivity relates to the classical approaches of analyzing stability of dynamical systems, e.g. Lyapunov theory and L2 stability and can be used to analyze stability of human-robot team control loops. Our approach is applicable not only to robots in free motion but also to robots with physical coupling as it occurs in cooperative object manipulation for example. It ultimately allows the safe control sharing in human-robot team interaction.

The challenge of asymmetry is also relevant when the number of feedback channels from the robot system to the human partner is too low. This occurs when the robot team interacts with environment through multiple contacts. Classical examples of such interaction are grasping and cooperative manipulation. *Kinesthetic*, grounded haptic devices, typically used as interfaces, cannot provide multi-contact feedback signals and have limited workspace. A solution to these problems could be to use *cutaneous*, wearable haptic devices, since they introduce a simplification of the hardware, can provide multi-contact feedback and mobility of the human operator. Together with the proposed subtask-based shared control approach we enhance the interaction by enabling the human operator to move freely in the workspace, which is achieved with wearable haptic fingertip devices. Experiments including human user studies [3] show the superiority of the proposed approach.

## Literature

- [1] Musić, Selma and Sandra Hirche. "Control sharing in human-robot team interaction." Annual Reviews in Control 44 (2017): 342-354.
- [2] Musić, Selma and Sandra Hirche. "Passive noninteracting control for human-robot team interaction." 2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC). IEEE, 2018.
- [3] Musić, Selma, et al. "Human–Robot Team Interaction Through Wearable Haptics for Cooperative Manipulation." IEEE transactions on haptics 12.3 (2019): 350-362.



# Systematische Analyse und Entwurf von Regelungseinrichtungen auf Basis von Lyapunov's direkter Methode

Rick Voßwinkel

Entwicklungszentrum Chemnitz/Stollberg  
IAV GmbH  
rick.vosswinkel@iav.de

Klaus Röbenack

Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie  
TU Dresden  
klaus.roebenack@tu-dresden.de

**Schlüsselwörter:** Lyapunov-Stabilität, Quadratsummenzerlegung, Quantorenelimination

Der Vortrag widmet sich der systematischen Betrachtung der Stabilitätsanalyse sowie dem Regelungsentwurf. Dabei werden sowohl numerische als auch algebraische Ansätze vorgestellt.

Den Ausgangspunkt stellen dabei Lyapunov's direkte Methode und deren Erweiterungen dar. Diese ermöglichen Formulierungen zur Überprüfung von Stabilität, Eingangs-Zustands-Stabilität, sowie inkrementelle Stabilitätseigenschaften. Auf deren Grundlage werden Bedingungen angegeben, die eine systematische Überprüfung zum einen mit Quadratsummenzerlegung und zum anderen mit Methoden der Quantorenelimination ermöglichen. Dazu werden die jeweiligen Begrifflichkeiten und Ansätze eingeführt.

Bei der Quadratsummenzerlegung wird anstatt einer Definitheitsprüfung versucht, den polynomialen Ausdruck in eine Summe von Quadraten zu zerlegen. Damit geht die positive Semidefinitheit des Ausdruckes einher. Diese Zerlegung lässt sich in ein semidefinites Programm überführen und numerisch lösen.

Grundidee der Quantorenelimination ist es, quantifizierte Ausdrücke in ein quantorenfrees Äquivalent umzuformen. Somit können die Parameterkonstellationen ermittelt werden, welche ein System mit den jeweiligen Eigenschaften ergeben.

Da die beiden Herangehensweisen lediglich die Betrachtung polynomialer Systembeschreibungen erlauben, wird eine Prozedur zur rationalen Umformung vorgestellt. Diese ermöglicht es durch Dimensionserhöhung und zusätzliche Nebenbedingungen, eine Vielzahl von nicht-polynomialen Systemen in adäquate polynomiale Beschreibungen zu überführen. Allerdings müssen dabei die sich aus dem Umformungsprozess ergebenden Nebenbedingungen berücksichtigt werden.

## Literatur

- [1] K. Röbenack und R. Voßwinkel. „Lösung regelungstechnischer Probleme mittels Quantorenelimination“. In: *at - Automatisierungstechnik*. 67(9), 2019, S. 714-726.
- [2] R. Voßwinkel. „Systematische Analyse und Entwurf von Regelungseinrichtungen auf Basis Lyapunov's direkter Methode“. Springer Vieweg, 2019.



# Output constrained sliding mode control: A variable gain approach

Mark Spiller and Dirk Söffker

Chair of Dynamics and Control  
University of Duisburg-Essen  
mark.spiller@uni-due.de, soeffker@uni-due.de

**Keywords:** Sliding mode control, constrained control

Sliding mode control (SMC) is a well established method for robust control of nonlinear systems. Consider a manifold in the state space. In the reaching phase of SMC the controller drives the states towards the manifold. A sliding mode is said to be established if the states reach the manifold and start to slide on its surface. Using an appropriate definition of the sliding surface, the states can be driven to the origin. Even in the presence of matched disturbances the states remain on the manifold. The main drawback of conventional SMC is occurrence of switching around the manifold denoted as chattering. The chattering may induce unstable dynamics or cause damage. Consequently most of the works in the literature are related to chattering attenuation. However, only few works about constraint SMC can be found. An invariant set approach for output constrained SMC is proposed in [1]. The unconstrained closed loop dynamics of a conventional SMC are described by a robust positive invariant (RPI) set. The RPI set has the form of a cylinder with ellipsoidal cross section. The ellipsoidal cross section can be defined by a positive definite matrix which is found solving a LMI. The constrained states are described by a convex set. The system fulfills the output constraints i.e. the states remain in the intersection of the cylinder and the convex set of the constraints, if a number of conditions are fulfilled. The proposed approach is restricted to linear systems, but can consider additive disturbances. A multi-regulator SMC for output constrained systems is proposed in [2]. The controller structure is based on a max-min selection scheme. These schemes are applied in aircraft engine control i.e. to control thrust of turbofan engines under various turbine related limits like temperature or pressure [3]. Instead of using linear controllers the max-min scheme proposed in [2] uses sliding mode controllers. However, the approach is restricted to linear systems and the switching gains have to be tuned by experiment. In [4] finite time SMC under explicit output constraints is considered. The proposed SMC consists of a proportional, and a switching term. The switching term ensures that the sliding mode is reached in finite time, whereas the gain of the proportional term can be design so that the output constraints are fulfilled. However, the corresponding gain has to be obtained from the solution of several LMIs, which are not guaranteed to be feasible. In [5] constraints are expressed as sliding variables using suitable diffeomorphisms. The sliding variables build an integrator chain. Driving the sliding variables to zero will enforce the constraints. Consequently, a higher order SMC is applied to drive the sliding variables to zero.

In this contribution output constraint sliding mode control of nonlinear relative degree two systems is considered. The constraints are formulated with respect to the first derivative of the control variable. The system may be effected by matched disturbances. Only the

uncertainty bounds are required to be determined. A multi-controller approach with variable gains is proposed. The controller guarantees that the constraints can at most be violated for a finite-time, which can be shortened by tuning the controller parameters. Despite the action of the multiple controllers the tracking error of the approach is guaranteed to be bounded.

## Literature

- [1] H. Richter, B. O'Dell und E. A. Misawa, „Robust positively invariant cylinders in constrained variable structure control,“ *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp. 2058--2069, 2007.
- [2] H. Richter, „A multi-regulator sliding mode control strategy for output-constrained systems,“ *Automatica*, pp. 2251--2259, 2011.
- [3] J. Litt, D. Frederick und T.-H. Guo, „The case for intelligent propulsion control for fast engine response,“ in *Proceedings of the AIAA Infotech Aerospace Conference*, Seattle, 2009.
- [4] J. Song, Y. Niu und Y. Zou, „Finite-time sliding mode control synthesis under explicit output constraint,“ *Automatica*, pp. 111--114, 2016.
- [5] G. P. Incremona, M. Rubagotti und A. Ferrara, „Sliding mode control of constrained nonlinear systems,“ *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp. 2965--2972, 2016.

# IDA-PBC for Underactuated Mechanical System in Implicit Representation

Oscar Cieza

Fachgebiet Regelungstechnik  
Technische Universität Ilmenau  
oscar.cieza@tu-ilmenau.de

Johann Reger

Fachgebiet Regelungstechnik  
Technische Universität Ilmenau  
johann.reger@tu-ilmenau.de

Among others, port-Hamiltonian systems [1] may be represented in (1) the implicit representation, where system models are obtained by aggregating simpler subsystems and the dynamics are described by differential-algebraic equations, and (2) the explicit representation, where the constraints (or interconnections) are simplified, and ordinary differential equations characterize its dynamics. In explicit Underactuated Mechanical Systems (UMSs), the application of Interconnection and Damping Assignment Passivity-Based Control (IDA-PBC) requires the solution of partial differential equations (PDEs). Although, great effort has been devoted to solve, simplify or completely avoid such PDEs, no general solution has been achieved, see e.g. [2, 3].

In this context, IDA-PBC has been intensively studied on explicit systems (see e.g. [4, 5]). However, very few research has been devoted to IDA-PBC on implicit ones [6, 7]. Therefore, following the research line of [7], we generalize the total energy shaping IDA-PBC to UMSs in the implicit framework and provide algebraic solutions for the matching conditions.

As provided in [8], we consider UMSs in implicit port-Hamiltonian representation of the form

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\rho} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_{n_r} \\ -I_{n_r} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^\top H}{\partial r} \\ \frac{\partial^\top H}{\partial \rho} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} \lambda + \begin{bmatrix} 0 \\ G \end{bmatrix} u, \quad (1a)$$

$$0 = B^\top \frac{\partial^\top H}{\partial \rho}, \quad (1b)$$

where  $r \in \mathcal{R} \subset \mathbb{R}^{n_r}$  and  $\rho \in \mathbb{R}^{n_r}$  are implicit generalized coordinates (position) and its momenta,  $u \in \mathbb{R}^{n_u}$  is the input,  $G : \mathcal{R} \rightarrow \mathbb{R}^{n_r \times n_u}$  is the implicit input matrix,  $B\lambda$  represent the constraint forces with  $\lambda \in \mathbb{R}^{n_\lambda}$  (implicit variable) and  $B : \mathcal{R} \rightarrow \mathbb{R}^{n_r \times n_\lambda}$ ,  $M : \mathcal{R} \rightarrow \mathbb{R}^{n_r \times n_r}$  is the symmetric and positive definite inertia matrix, and  $H := \frac{1}{2}\rho^\top M^{-1}\rho + V$  (Hamiltonian) represents the total energy. System (1) is underactuated if  $\text{rank } S < n_r$ ,  $S = \begin{bmatrix} G & B \end{bmatrix}$ .

Similar to the explicit case, the IDA-PBC for implicit UMSs is solved if the matching condition of the potential energy shaping

$$S^\perp \frac{\partial^\top V}{\partial r} - \left( S^\perp - K_m B^\top M^{-1} \right) M_d M^{-1} \frac{\partial^\top V_d}{\partial r} = 0, \quad \text{and} \quad (2a)$$

the matching condition of the kinetic energy shaping

$$S^\perp \frac{\partial^\top \rho^\top M^{-1} \rho}{\partial r} - \left( S^\perp - K_m B^\top M^{-1} \right) \left( M_d M^{-1} \frac{\partial^\top \rho^\top M_d^{-1} \rho}{\partial r} + W_1 M_d^{-1} \rho \right) + K_m L_r = 0 \quad (2b)$$

hold with  $(r, \rho) = (r^*, 0)$  an isolated minimum of  $H_d := \frac{1}{2}\rho^\top M_d^{-1}\rho + V_d$  (target Hamiltonian), where  $V_d : \mathcal{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $M_d : \mathcal{R} \rightarrow \text{GL}(n_r, \mathbb{R})$  is the desired symmetric inertia matrix,  $L_r = -\frac{\partial^\top B^\top M^{-1}\rho}{\partial r} M^{-1}\rho$ ,  $K_m = S^\perp M_d M^{-1} B (B^\top M^{-1} M_d M^{-1} B)^{-1}$ ,  $S^\perp$  is the full rank left annihilator of  $S$ , and  $W_1 : \mathcal{R} \times \mathbb{R}^{n_r} \rightarrow \mathbb{R}^{n_r \times n_r}$  is linear in  $\rho$  and skew-symmetric.

We focus on the case with constant inertia matrix  $M$  (very likely state-dependent in explicit coordinates) and  $S^\perp M_d M^{-1} B = 0$  (or equivalently  $K_m = 0$ ). Here, we can greatly reduce or avoid the kinetic shaping PDEs (2b). Besides, under some additional requirements, we are able to obtain algebraic solutions for the matching conditions, avoiding PDEs.

Our scheme in general is not confined to holonomic constraints, can modify the interconnection and dissipation matrix, and accepts a sign indefinite target inertia matrix. Finally, the approaches are verified on a standard UMS example, namely the cart-pole system.

- [1] F. Castaños, D. Gromov, V. Hayward, and H. Michalska, “Implicit and explicit representations of continuous-time port-Hamiltonian systems,” *Systems & Control Letters*, vol. 62, no. 4, pp. 324–330, 2013.
- [2] J. Á. Acosta, R. Ortega, A. Astolfi, and A. D. Mahindrakar, “Interconnection and damping assignment passivity-based control of mechanical systems with underactuation degree one,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 50, no. 12, pp. 1936–1955, 2005.
- [3] G. Viola, R. Ortega, R. Banavar, J. A. Acosta, and A. Astolfi, “Total energy shaping control of mechanical systems: Simplifying the matching equations via coordinate changes,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, no. 6, pp. 1093–1099, 2007.
- [4] R. Ortega and E. García-Canseco, “Interconnection and damping assignment passivity-based control: A survey,” *European Journal of Control*, vol. 10, no. 5, pp. 432–450, 2004.
- [5] A. Donaire, R. Ortega, and J. G. Romero, “Simultaneous interconnection and damping assignment passivity-based control of mechanical systems using generalized forces,” *Systems & Control Letters*, vol. 94, no. 1, pp. 118–126, 2016.
- [6] A. Macchelli, “Passivity-based control of implicit port-Hamiltonian systems,” *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 52, no. 4, pp. 2422–2448, 2014.
- [7] F. Castaños and D. Gromov, “Passivity-based control of implicit port-Hamiltonian systems with holonomic constraints,” *Systems & Control Letters*, vol. 94, no. 1, pp. 11–18, 2016.
- [8] A. Van der Schaft, “Port-Hamiltonian differential-algebraic systems,” in *Surveys in Differential-Algebraic Equations I*, A. Ilchmann and T. Reis, Eds. Springer, 2013, pp. 173–226.

# **Semantische Interoperabilität in cyber-physikalischen Produktionssystemen**

M.Sc. Tizian Schröder, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, tizian.schroeder@ovgu.de

Prof. Dr.-Ing. Christian Diedrich, Lehrstuhlleiter, christian.diedrich@ovgu.de

## **Schlüsselwörter**

Semantik, Semantische Interoperabilität, Internet of Things (IoT), Industrial Internet of Things (IIoT), Wissensbasierte Systeme, Ontologie

## **Kurzbeschreibung des Vortragsinhalts**

Die Vision des industriellen Internets der Dinge (IIoT) sieht vor, das Paradigma des ‚Internet of Things‘ (IoT) auf industrielle Anwendungsdomänen anzuwenden. Dies schließt Bereiche wie beispielsweise Städte, Gebäude, Fertigung, Transport, Landwirtschaft oder Medizin ein, da hier Informationen entlang einer Wertschöpfungskette ausgetauscht werden. Hierbei wird über eine Vielzahl dezentraler Systeme ein dezentral organisiertes Netzwerk von Systemen über das Internet gebildet, in dem autonome, intelligente Teilnehmer zum Zweck ihrer individuellen Zielerreichung miteinander interagieren.

Als grundlegendste Motivation dieser Bemühung kann es angesehen werden, die schon heute enorme und zukünftig potentiell noch weiterwachsende Komplexität von Netzwerken von Systemen dadurch besser beherrschbar zu machen, dass von einem zentralistischen, auf der Automatisierungspyramide basierendem Ansatz zu einem dezentralen Ansatz übergegangen wird. Der Idee der cyber-physikalischen (Produktions-)Systeme (CP(P)S) folgend, werden physische Systeme durch eine digitale Repräsentanz erweitert, um eine Integration der physischen Welt in die Informationswelt vorzunehmen (Digitalisierung).

Auf diesem Konzept aufbauend entsteht in der Digital Factory ein Netzwerk von Systemen, in dem diese als dezentrale Akteure nachrichtenbasiert miteinander interagieren. In derartigen verteilten Systemen müssen, insbesondere bei Domänen-übergreifender Kommunikation, mehrere Ebenen der Interoperabilität berücksichtigt werden, um Informationen austauschen zu können. Dem European Telecommunications Standards Institute (ETSI) White Paper ‚Achieving technical interoperability‘ [1] folgend, kann bezüglich der Interoperabilität zwischen vier Ebenen unterschieden werden: technische, syntaktische, semantische und organisatorische. Während das ISO-OSI-Modell [2] den Bereich der technischen Interoperabilität abdeckt, berühren Middleware-Systeme bereits die syntaktische und semantische Ebene.

Semantische Interoperabilität gilt als einer der Schlüssel zur Umsetzung der Ideen hinter dem Paradigma des ‚Industrial Internet of Things‘ (IIoT). Um heterogene Systeme über Anwendungsdomänen hinweg interoperabel kommunizieren lassen zu können, wird zunächst eine präzise Definition des Begriffs ‚Semantik‘ benötigt. Denn nur auf einer formalen Basis lassen sich Informationen zwischen verteilten IIoT-Geräten korrekt austauschen.

Dieser Beitrag fokussiert sich insbesondere auf diese dritte Ebene und liefert eine formale Definition des Begriffs ‚Semantik‘, der hilft, Lösungsansätze für die semantische Interoperabilität innerhalb solcher Netzwerke von Systemen weiterzuentwickeln. Auf der Ebene des Verständnisses, zumindest aber was die Terminologie betrifft, ist diese Sichtweise auf den Begriff der Semantik nach unserer Erkenntnis derzeit nicht etabliert. Stattdessen

existiert eine Reihe von intuitiv motivierten Ansätzen, die beabsichtigen, den Begriff der Semantik zu präzisieren wie die Wissenspyramide [3] oder das LCIM [4]. Der Beitrag stellt diese Ansätze vor und ordnet diese kritisch in den Kontext des vorgeschlagenen Modells ein. Zudem werden weitere bestehende aber einen anderen Zweck adressierende Konzepte wie Ontologien [5], die Semantik von Datentypen [6, 7] und die axiomatische, denotationelle sowie operationelle Semantik von Programmen [8, 9] in Beziehung zum Inhalt des Beitrags gesetzt.

## Literatur

[1] ETSI: *ETSI White Paper No. 3 – Achieving Technical Interoperability – the ETSI Approach*. 2008.

[2] ISO/IEC: *ISO/IEC 7498-1 – Information technology — Open Systems Interconnection — Basic Reference Model: The Basic Model*. 1994.

[3] Aamodt, A.; Nygard, M.: *Different roles and mutual dependencies of data, information, and knowledge – An All perspective on their integration*. *Data and Knowledge Engineering*, 16 (3), S. 191–222, 1995.

[4] Turnitsa, C. D.: *Extending the Levels of Conceptual Interoperability Model*. *Proceedings IEEE Summer Computer Simulation Conference*, 2005.

[5] Studer, R.; Benjamins, R.; Fensel, D.: *Knowledge engineering: Principles and methods*. *Data & Knowledge Engineering*, 25 (1–2), S. 161–198, 1998.

[6] Dale, N. B.: *Abstract data types: Specifications, implementations, and applications*. D.C. Heath, 1996.

[7] Noble, J.; Potanin, A.; Murray, T.; Miller, M. S.: *Abstract and Concrete Data Types vs Object Capabilities*. In: Müller, P.; Schaefer, I. (eds) *Principled Software Development*. Springer, Cham, 2018.

[8] Stump, A.: *Programming Language Foundations*. John Wiley & Sons, 2013.

[9] Nielson, H. R.; Nielson, F.: *Semantics with Applications: An Appetizer*. Springer-Verlag London, 2007.

# Adaptive und lernfähige Regelung der Qualität basierend auf LSTM Netzen am Beispiel der diskreten Fertigung

Benjamin Lindemann

Institut für Automatisierungstechnik und  
Softwaresysteme, Universität Stuttgart  
benjamin.lindemann@ias.uni-stuttgart.de

Michael Weyrich

Institut für Automatisierungstechnik und  
Softwaresysteme, Universität Stuttgart  
michael.weyrich@ias.uni-stuttgart.de

**Schlüsselwörter:** Rekurrente Neuronale Netze, Long short-term memory, diskrete Fertigung, Regelung der Qualität

Mehrstufige Prozessketten in der diskreten Fertigung stehen vor der Herausforderung, trotz auftretender Störungen ein hochwertiges und reproduzierbares Qualitätsergebnis zu gewährleisten. Dazu werden Lösungen benötigt, die die zunehmende Komplexität entlang der zusammenhängenden und hochgradig dynamischen Einzelprozesse beherrschbar machen. In diesem Beitrag wird ein datengetriebener Ansatz zur adaptiven Qualitätsregelung mehrstufiger Prozesse vorgestellt, auf dessen Basis Modellunsicherheiten und Störungen charakterisiert werden, die zur Entwurfszeit des Systems nicht bekannt waren. Dazu wurde eine Netzarchitektur in Form eines Sequence-to-Sequence Netzes mit Long Short-Term Memory (LSTM) Zellen entworfen, die es ermöglicht, eine genaue Abbildung und Vorhersage zeitvarianten Prozessverhaltens zu realisieren. Das bestehende Prozessmodell wird um diese lernfähige Komponente erweitert. Dadurch kann erlernt werden, welche Anpassung am Stellverhalten vorgenommen werden muss, um erwartete Modellunsicherheiten und Störungen zu kompensieren und das Qualitätsergebnis zu optimieren. Der Ansatz wurde prototypisch anhand realer Prozessketten der diskreten Fertigung umgesetzt und evaluiert.

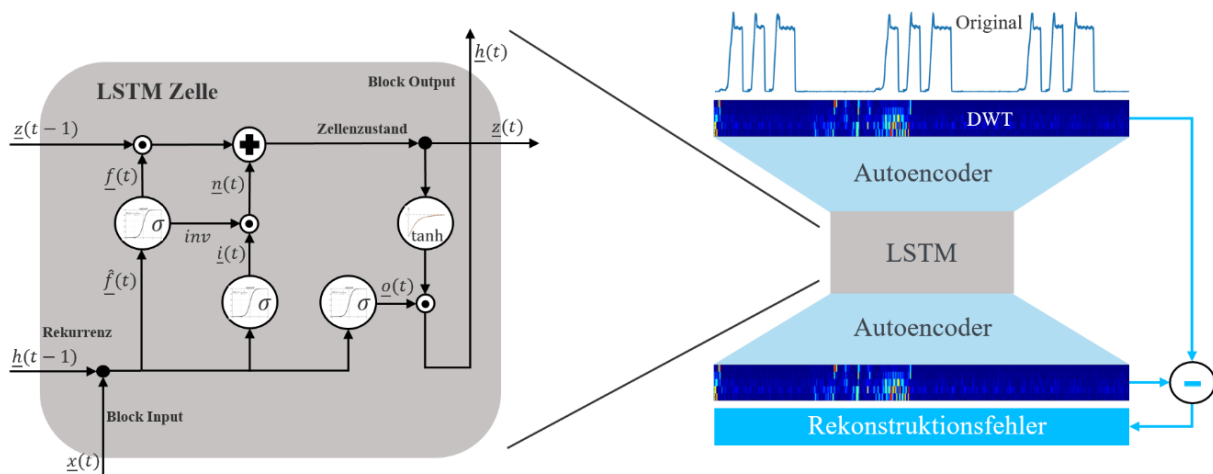


Abbildung 1: Aufbau einer LSTM Zelle und Netzarchitektur

[1] S. Hochreiter und J. Schmidhuber. Long Short-Term Memory. In: Neural Computation, Vol. 8, S. 1735-1780, 1997.

[2] *J. Li, C. Wu, S. Li, J. Yang und S. Li*: Optimal disturbance rejection control approach based on a compound neural network prediction method. In: *Journal of Process Control*. Vol. 24, Issue 10, S. 1516-1526, 2014.

[2] *B. Lindemann, F. Fesenmayr, N. Jazdi und M. Weyrich*: Anomaly Detection in Discrete Manufacturing Using Self-Learning Approaches. In: *12<sup>th</sup> CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, Vol. 79, S. 313-318, 2018.



# Multimodale Optimierung zur energieoptimalen Trajektorienplanung von Schienenfahrzeugen

Lukas Pröhl

Lehrstuhl für Mechatronik  
Universität Rostock  
Lukas.Proehl@uni-rostock.de

Harald Aschemann

Lehrstuhl für Mechatronik  
Universität Rostock  
Harald.Aschemann@uni-rostock.de

**Schlüsselwörter:** Multimodale Optimierung, energieoptimale Trajektorienplanung, Firefly-Algorithmus, Simulation elektrischer Schienenfahrzeuge

Das Ziel dieses Beitrags ist die Bestimmung einer energieoptimierten Geschwindigkeitstrajektorie für elektrische Schienenfahrzeuge. Die Grundlage der Optimierung bildet ein detailliertes quasi-statisches Modell des vollständigen elektrischen Antriebsstrangs eines standardisierten elektrischen Schienenfahrzeugs.

Um den hohen Rechenaufwand einer dynamischen Programmierung zu vermeiden, wurde bereits in [1] ein heuristischer Ansatz zur Trajektorienplanung umgesetzt:

Durch eine geeignete Kombination von vier grundlegenden Fahrzuständen – Beschleunigung, Beharrungsfahrt (Halten der Geschwindigkeit), Rollen und Bremsen – lassen sich beliebige Geschwindigkeitstrajektorien zusammensetzen, siehe Abbildung 1. Mithilfe einer geeigneten Wahl der Umschaltzeitpunkte zwischen den Fahrzuständen kann somit eine energieoptimierte Fahrstrategie umgesetzt werden.

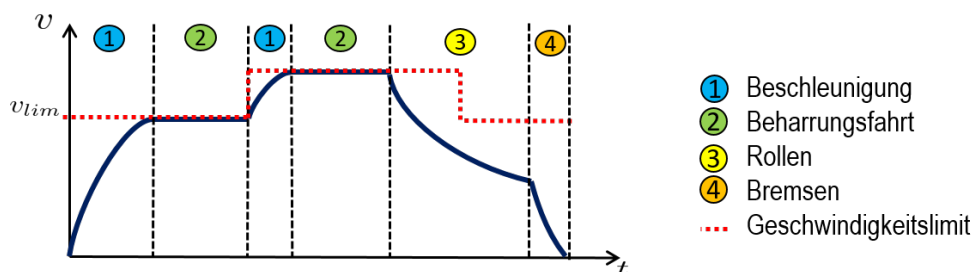


Abbildung 1: Zusammensetzung der Trajektorie mittels vier verschiedener Fahrzustände

Bedeutende Vorteile dieser Heuristik sind die einfache Handhabung von Stellgrößen- und Zustandsbeschränkungen (z.B. maximale Antriebs-/Bremskräfte, Geschwindigkeitslimits) sowie die geringere Dimension des resultierenden Optimierungsproblems. Mittels der gradientenfreien Partikelschwarm-Optimierung wird in [2] ein geeignetes Optimierungsproblem gelöst, welches eine energieoptimale Parametrierung der Heuristik liefert. Das zu lösende Optimierungsproblem berücksichtigt neben einer Minimierung des Energieverbrauchs zusätzlich die durch den Fahrplan vorgegebenen Nebenbedingungen (An- und Abfahrtszeiten sowie Geschwindigkeitslimits). Nachteilig an einer Kombination aus der Minimierung des Energieverbrauchs und der gleichzeitigen Berücksichtigung des Fahrplans ist die schwierige Parametrierung der zu optimierenden Gütefunktion und die damit verbundene Unsicherheit beim Bestimmen des globalen Optimums.

Um den Rechenaufwand weiter zu reduzieren und die Genauigkeit der Optimierung zu erhöhen, wird im Rahmen dieses Beitrages ein zweistufiger Optimierungsprozess vorgestellt:

Im ersten Schritt werden mittels einer multimodalen Optimierung Lösungskandidaten bestimmt, welche die zeitlichen sowie die positionsabhängigen Randbedingungen des Fahrplans erfüllen. Zur Lösung dieser multimodalen Optimierung wird der Firefly-Algorithmus [3] eingesetzt, welcher es ermöglicht, alle lokalen Extrempunkte eines Optimierungsproblems zu bestimmen. Da in diesem Schritt der Energieverbrauch noch nicht berücksichtigt wird, kann zunächst ein vereinfachtes Zugmodell verwendet werden, welches lediglich die mechanischen Eigenschaften (Fahrwiderstände, max. Antriebs- und Bremsleistung) berücksichtigt. Die Bestimmung der energieoptimalen Trajektorie wird im zweiten Schritt vorgenommen. Innerhalb eines stark eingeschränkten Parameterraums, siehe Abbildung 2, kann nun die energieoptimale Trajektorie bestimmt werden.

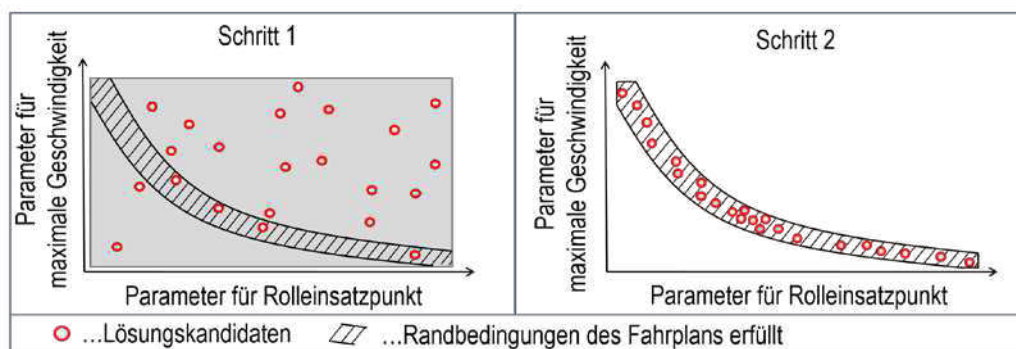


Abbildung 2: Zweistufiger Optimierungsprozess

Hierfür wird das detaillierte Modell des Antriebsstrangs ausgewertet, das neben den Leistungsverlusten der Antriebsstrangkomponenten auch den Energieverbrauch von Nebenaggregaten berücksichtigt.

## Literatur

- [1] M. Leska. Berechnung kraftstoffoptimaler Trajektorien und Betriebsstrategien für Diesel-Hybrid-Schienenfahrzeuge. Dissertation. In: H. Aschemann (Edit.), Berichte aus dem Lehrstuhl für Mechatronik, Band 3, Shaker-Verlag, Aachen, 2016.
- [2] L. Pröhl, H. Aschemann. Energy optimal trajectory planning for electrically driven railway vehicles with particle swarm optimization. In: Proc. of ICCA'19 – International Conference on Control and Automation, Edinburgh, 2019. IEEE.
- [3] X. S. Yang, Firefly algorithms for multimodal optimization, in: Stochastic Algorithms: Foundations and Applications, SAGA 2009, Lecture Notes in Computer Science, 5792, 169-178 (2009).

# Verhaltensentscheidung für automatisierte Fahrzeuge mittels Arbitrationsgraphen

Piotr Orzechowski  
Mobile Perception Systems  
FZI Forschungszentrum Informatik  
orzechowski@fzi.de

Christoph Burger  
Institut für Mess- und Regelungstechnik (MRT)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
christoph.burger@kit.edu

**Schlüsselwörter:** Verhaltensentscheidung, Arbitration, Automatisierte Fahrzeuge, ADAS

In den letzten Jahren konnten beachtliche Erfolge im Bereich automatisierter Fahrzeuge, sowie dem verwandten Feld der Fahrerassistenzsysteme, beobachtet werden. Insbesondere dank der Forschung zu tiefen künstlichen neuronalen Netzen hat sich die Umfeldwahrnehmung und -voraussage, wesentlich verbessert.

Neben der Wahrnehmung ist jedoch die Entscheidungsfindung eine der größten Herausforderungen für das vollautomatisierte Fahren. Im urbanen Straßenverkehr sieht sich ein Autofahrer mit einer Vielzahl von Entscheidungen konfrontiert. Die meisten Entscheidungen, wie Halten an einer Ampel oder Zebrastreifen, die Wahl der Lücke beim Spurwechsel und Vorfahrtgewähren beim Abbiegen, werden vom Menschen überwiegend reaktiv gefällt. Einige langfristige Entscheidungen, wie die der Ziel- und Routenwahl, des Fahrstils und der Verhaltenspräferenzen, betrachten hingegen einen längeren Planungshorizont.

Obwohl bereits für einige komplexe Szenarien signifikante Fortschritte in der Verhaltensplanung erzielt wurden [1-3], hat sich bisher keine weithin akzeptierte Methodik durchsetzen können, die in der Lage ist, diese zahlreichen Insellösungen in einer generalisierenden und skalierbaren Architektur zu kombinieren. Wie und wann wird von einem Planungsalgorithmus zum Reißverschlussverfahren auf einen Algorithmus für Folgefahrt, einen Spurwechsel oder gar ein Einparkmanöver gewechselt? Bisherige Forschungsplattformen, die sich auf Wettbewerben, wie der DARPA Urban Challenge [4], oder durch reale Testfahrten im Straßenverkehr [5,6] behauptet haben, haben überwiegend auf endliche Zustandsautomaten gesetzt. Solche eignen sich zwar gut für eine kleine Auswahl an Verhaltensoptionen und Manövern, die jeweils durch einen Zustand des Automaten modelliert werden. In der Praxis arten Zustandsautomaten allerdings für komplexere Verhaltensprobleme aus, so dass schlechte Nachvollziehbarkeit, Wartbarkeit als auch Erweiterbarkeit die Suche nach anderen Architekturen motivieren.

Die Robotik unterscheidet im Feld der sogenannten Aktionsselektion zwischen wissens- und verhaltensbasierten Systemen. Wissensbasierte Systeme, wie endliche Zustandsautomaten, erstellen zunächst eine globale Wissensdatenbank, mit deren Hilfe ein zentrales Modul schließlich im Top-down-Ansatz die Selektion durchführen soll. Das Selektionsmodul (oder der entwerfende Entwickler) muss folglich die Voraussetzungen, Auswirkungen und Interaktionen aller vorhandenen Aktionen kennen, um die richtigen Zustandsübergänge auszulösen. In verhaltensbasierten Systemen werden die Aktionen hingegen möglichst modular voneinander entkoppelt und sollen selbst ihre Voraussetzungen und Auswirkungen abschätzen können. Diese atomaren Aktionen werden anschließend im Bottom-up-Ansatz zu komplexeren

Aktions- bzw. Verhaltensmustern kombiniert. Hierfür wurden zahlreiche Architekturen, wie hierarchische Verhaltensebenen [7], Aktivierungsnetzwerke [8] oder Votation [9] entworfen.

Wir schlagen für das automatisierte Fahren einen verhaltensbasierten Ansatz zur Entscheidungsfindung vor, der die atomaren Verhalten mittels generischer Arbitratoren in einer hierarchischen Struktur miteinander kombiniert. Eine solche Architektur wurde in ähnlicher Weise bereits erfolgreich im Roboterfußball eingesetzt [10]. Hierbei übernimmt jedes atomare Verhaltensmodul die jeweils notwendige Interpretation des Umgebungsmodells und der vorhandenen Verkehrssituation, während die Arbitratoren über keinerlei Umgebungsinformation verfügen. Statt dessen fällen Arbitratoren die Verhaltensentscheidung auf abstrakten Informationen, die von den Verhaltensmodulen selbst zur Verfügung gestellt werden, beispielsweise dem voraussichtlichen Nutzen eines Verhaltens, oder beim Entwurf festgelegt werden, wie der Priorität einer Verhaltensoption. So entworfene Arbitrationsgraphen haben zum Vorteil, dass deren Auswahl, somit das resultierende Fahrverhalten, gut nachvollziehbar ist, die Architektur wartbar bleibt und einfach um weitere Verhalten erweitert werden kann.

## Literatur

- [1] S. Hoermann, F. Kunz, D. Nuss, S. Renter, and K. Dietmayer, "Entering crossroads with blind corners. A safe strategy for autonomous vehicles," in 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2017.
- [2] C. Hubmann, J. Schulz, M. Becker, D. Althoff, and C. Stiller, "Automated Driving in Uncertain Environments: Planning With Interaction and Uncertain Maneuver Prediction," IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, vol. 3, no. 1, pp. 5–17, Mar. 2018.
- [3] M. Bouton, A. Nakhaei, K. Fujimura, and M. J. Kochenderfer, "Scalable Decision Making with Sensor Occlusions for Autonomous Driving," in 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2018, pp. 2076–2081.
- [4] M. Buehler, K. Iagnemma, and S. Singh, Eds., The DARPA Urban Challenge: Autonomous Vehicles in City Traffic, vol. 56. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [5] J. Ziegler et al., "Making Bertha Drive – An Autonomous Journey on a Historic Route," IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 6, no. 2, pp. 8–20, Summer 2014.
- [6] M. Aeberhard et al., "Experience, Results and Lessons Learned from Automated Driving on Germany's Highways," IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 7, no. 1, pp. 42–57, Spring 2015.
- [7] R. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot," IEEE Journal on Robotics and Automation, vol. 2, no. 1, pp. 14–23, Mar. 1986.
- [8] Pattie Maes, "How to do the right thing," Connection Science, vol. 1, no. 3, pp. 291–323, 1989.
- [9] Julio K. Rosenblatt, "DAMN: a distributed architecture for mobile navigation," Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, vol. 9, no. 2–3, pp. 339–360, 1997.
- [10] S. Lange, M. Riedmiller, and S. Welker, "Brainstormers Tribots team description," in In RoboCup-2006, 2006.

# Optimale Bewegungsplanung mit Unsicherheitsbewertung für vollautomatisierte Einfädelmanöver unter Nutzung unsicherer Sensordaten aus der Infrastruktur

Johannes Müller

Institut für Mess-, Regel-  
und Mikrotechnik  
Universität Ulm  
johannes-christian.  
mueller@uni-ulm.de

Michael Buchholz

Institut für Mess-, Regel-  
und Mikrotechnik  
Universität Ulm  
michael.buchholz@uni-ulm.de

Klaus Dietmayer

Institut für Mess-, Regel-  
und Mikrotechnik  
Universität Ulm  
klaus.dietmayer@uni-ulm.de

**Schlüsselwörter:** Unsicherheitsbewertung, Zuverlässigkeitsschätzung, Subjective Logic, Bewegungsplanung, Trajektorienplanung, automatisiertes Fahren, Optimalsteuerung

Komplexe urbane Verkehrsszenarien mit Verdeckungen stellen automatisierte Fahrzeuge aufgrund der Limitierungen der bordeigenen Sensorik vor große Herausforderungen. Infrastruktursensoren können helfen, derartige Verdeckungen aufzulösen und die dazugehörigen Fahrmanöver effizient zu bewältigen, auch wenn die Eigenwahrnehmung des automatisierten Fahrzeugs dazu nicht ausreichen würde. Verlässt sich das automatisierte Fahrzeug jedoch auf falsche Informationen aus der Infrastruktur, kann dies zu kritischen Situationen führen.

Um ein sicheres Manöver zu garantieren, muss daher zunächst die Zuverlässigkeit der eingehenden Information geschätzt und bewertet werden. Herausforderung dabei ist ein sehr kleiner Umfang an Daten, auf deren Basis diese Verarbeitung erfolgen muss. Dazu wird ein Verfahren [1] auf Basis der neuen Theorie Subjective Logic [2] vorgestellt, welches die Zuverlässigkeitsschätzung in einem probabilistischen Framework automatisiert löst. Diese ist in Abbildung 1 veranschaulicht. Dazu werden vier verschiedene Aspekte der eingehenden Information auf Basis der Subjective Logic auf Konsistenz und Plausibilität überprüft: Im Prädiktionstest wird das aktuell gemessene Umgebungsmodell mit den in früheren Zeitschritten prädizierten Umgebungsmodellen auf Konsistenz getestet. Der Kartentest prüft, ob das gemessene Umgebungsmodell zur hinterlegten digitalen Karte passt. Der Ego-Perzeptionstest überprüft das eingehende Umfeldmodell mithilfe der fahrzeugeigenen Sensoren auf Plausibilität, und der Lokalisierungstest verifiziert anhand der Eigenzustandsschätzung, ob die im eingehenden Umfeldmodell angegebenen Unsicherheiten plausibel sind. Die Ergebnisse der einzelnen Tests werden mithilfe von durch die Subjective Logic definierten Operatoren fusioniert und ergeben die Gesamtzuverlässigkeit der übermittelnden Informationsquelle.

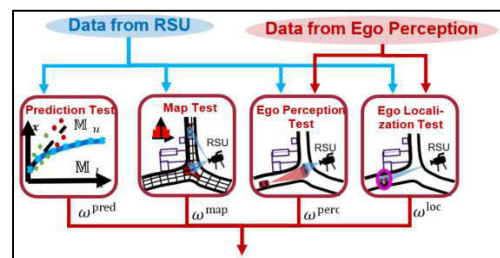


Abbildung 1: Zuverlässigkeitsschätzung

Darauf aufbauend wird ein Bewegungsplanungskonzept formuliert, welches mit einem Risikomodelleinerseits das Restrisiko des geplanten Manövers minimiert, andererseits aber auch den Fahrkomfort für die Insassen maximiert [3]. Dazu wird zunächst, ähnlich wie in [4], ein

vereinfachtes Optimierungsproblem aufgestellt und analytisch gelöst. Die Lösung des gesamten Optimierungsproblems erfolgt dann durch eine Gittersuche über den Lösungsraum. Auf diese Weise ist es möglich, in einem Optimierungsschritt Lösungen aus verschiedenen Homotopieklassen zu berücksichtigen, die mit verschiedenen Verhaltensentscheidungen korrespondieren. Gleichzeitig reduziert sich der abzutastende Lösungsraum durch die analytische Lösung des vereinfachten Optimierungsproblems deutlich. Abbildung 2 visualisiert die Bewegungsplanung am Beispiel eines Rechtsabbiegemanövers. Zu sehen ist die Punktwolke eines LIDAR-Sensors und die farbcoodierte, geplante Trajektorie des Ego-Fahrzeugs sowie eine Referenzlinie, die der Planung als Positionssollwertvorgabe dient. Das Ego-Fahrzeug fädelt hinter einem anderen Fahrzeug auf der Vorfahrtstraße ein während ein vorausfahrendes Fahrzeug gerade links abbiegt.

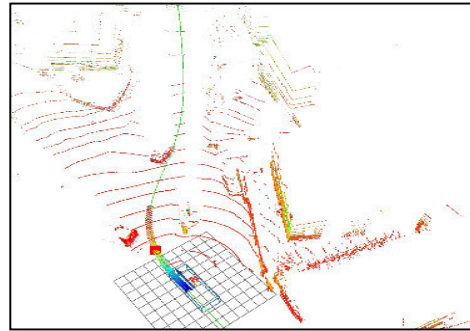


Abbildung 2: Bewegungsplanung

Abbildung 2 visualisiert die Bewegungsplanung am Beispiel eines Rechtsabbiegemanövers. Zu sehen ist die Punktwolke eines LIDAR-Sensors und die farbcoodierte, geplante Trajektorie des Ego-Fahrzeugs sowie eine Referenzlinie, die der Planung als Positionssollwertvorgabe dient. Das Ego-Fahrzeug fädelt hinter einem anderen Fahrzeug auf der Vorfahrtstraße ein während ein vorausfahrendes Fahrzeug gerade links abbiegt.

Zur Absicherung der Fahrfunktion wird auf einen mengenbasierten Ansatz von Pek et al. [5] zurückgegriffen. Dieser unterteilt die Menge der auf der Ego-Trajektorie liegenden Zustände (bestehend aus Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung) in drei Untermengen: die erste beschreibt die Zustände, von denen aus das Fahrmanöver mit einer geeigneten Fail-Safe-Strategie noch garantiert sicher abgebrochen werden kann, die zweite einen kritischen Übergangsbereich und die dritte eine Menge von Zuständen, von der aus das Ego-Fahrzeug mit jedem geeigneten Regelgesetz den Zielzustand garantiert sicher erreicht. Besonders interessant sind hierbei die Randpunkte der ersten und der dritten Zustandsmenge, der „point of no return“ und der „point of guaranteed arrival“. Beide Zustände werden im Rahmen der Bewegungsplanung online bestimmt und in die Optimierung der Trajektorie über das Risikomodell mit einbezogen.

Im Rahmen des Vortrags wird zunächst das Gesamtkonzept vorgestellt und dann auf die beiden Teilaspekte Zuverlässigkeitsschätzung und Bewegungsplanung näher eingegangen. Daneben werden die Sicherheitskonzepte und Bewertungskriterien für die Zuverlässigkeit näher erläutert und exemplarisch Evaluationsergebnisse von einer Testkreuzung in Ulm präsentiert.

## Literatur

- [1] J. Müller, M. Gabb und M. Buchholz. „A Subjective-Logic-based Reliability Estimation Mechanism for Cooperative Information with Application to IV's Safety“. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2019.
- [2] A. Jøsang „Subjective Logic“. In: *Springer International Publishing*. 2016.
- [3] J. Müller und M. Buchholz. „A Risk and Comfort Optimizing Motion Planning Scheme for Merging Scenarios“. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. 2019.
- [4] M. Werling et al. „Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a front frame“. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2010.
- [5] C. Pek et al. „Enhancing motion safety by identifying safety-critical passageways“. In: *IEEE Annual Conference on Decision and Control (CDC)*. 2017.

# Entwurf effizienter Beobachter mittels Spektraltheorie für linear-zeitvariante Systeme

Markus Tranninger

Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik  
Technische Universität Graz  
markus.tranninger@tugraz.at

**Schlüsselwörter:** linear-zeitvariante Systeme, Detektierbarkeit, Beobachterentwurf, Dichotomie-Spektrum, gleichförmige exponentielle Stabilität

Dieser Vortrag diskutiert Beobachterentwurfskonzepte für eine Klasse von linear-zeitvarianten Systemen. Solche Systeme sind von besonderem Interesse, da sie aus der Linearisierung nichtlinearer Systeme um eine Trajektorie entstehen können. Existierende Beobachterkonzepte für linear-zeitvariante Systeme, wie z.B. der Kalman-Bucy Filter [1], finden weitläufige Anwendung in Theorie und Praxis.

Die Existenz solcher Beobachter ist eng mit der Detektierbareitseigenschaft des zugrundeliegenden Systems verknüpft. Im Gegensatz zu linear-zeitinvarianten Systemen existieren jedoch verschiedene Detektierbarkeitskonzepte, die im Zusammenhang mit den Stabilitätseigenschaften der Schätzfehlerdynamik stehen.

Mit Hilfe der Eigenwerte der zeitvarianten Systemmatrix lässt sich im Allgemeinen keine Aussage über die Stabilitätseigenschaften des zugrundeliegenden Systems treffen. Als mögliche Verallgemeinerung des zeitinvarianten Falls werden in diesem Vortrag das Lyapunov-Spektrum und das Dichotomie-Spektrum diskutiert. Ein negatives Lyapunov-Spektrum garantiert exponentielle Stabilität, während ein negatives Dichotomie-Spektrum gleichförmige exponentielle Stabilität impliziert.

Basierend auf den erwähnten spektralen Konzepten werden neue Detektierbarkeitsbedingungen präsentiert. Für Systeme mit hoher Systemordnung erlauben diese den Entwurf effizienter Beobachter. Die zugrunde liegende Idee dabei ist, nur instabile oder langsam abklingende Moden der Schätzfehlerdynamik zu beeinflussen [2].

Die Umsetzung in Simulation und Experiment unterstreicht die Eigenschaften der vorgestellten Beobachterkonzepte.

## Literatur

- [1] R. E. Kalman und R. S. Bucy. „New Results in Linear Filtering and Prediction Theory“. In: *Journal of Basic Engineering*. Vol. 83, Nr. 1, 1961.
- [2] M. Tranninger, R. Seeber, S. Zhuk, M. Steinberger und M. Horn. „Detectability Analysis and Observer Design for Linear Time Varying Systems“. In: *IEEE Control Systems Letters*. Vol. 4, Nr. 2, 2020

# Kalman-Filter als Beobachter in der Anwendung

Benedikt Haus und Paolo Mercorelli

Lehrstuhl für Regelungs- und Antriebstechnik  
Institut für Produkt- und Prozessinnovation  
Leuphana Universität Lüneburg

Das Kalman-Filter (KF) ist ein optimaler, kovarianzminimierender Schätzalgorithmus und lässt sich hervorragend als Zustandsbeobachter für nicht messbare Größen verwenden. In diesem Kontext kann es als Erweiterung des Luenberger-Beobachters interpretiert werden. Prinzip ist, a-priori vorhandenes Modellwissen (in Form einer Prädiktion) mit Messungen eines oder mehrerer Ausgänge so zu kombinieren, dass – unter strengen Voraussetzungen – bestmögliche Schätzwerte für die Zustände erhalten werden. Auch wenn diese nicht vollständig erfüllt sind, liefert es meist sehr gute Resultate. Sogar für nichtlineare Systeme kann man (suboptimale) KFs entwerfen, z.B. das Extended Kalman-Filter (EKF). Häufig verwandte Schlagworte sind Sensorfusion, Störbeobachter und sensorlose/-reduzierte Regelungen. In diesem Vortrag geht es weniger um die zugrundeliegende Theorie als vielmehr um die Implementierung in der Praxis, für lineare und nichtlineare Systeme, anhand einiger Beispiele:

- Schätzung der Temperatur der kalten Seite von Peltier-Elementen mit Messungen von  $T_{warm}$ ,  $U$  und  $I$  zur Regelung eines Werkstück-Einspannsystems auf Eisbasis [1]
- Schätzung von Temperatur und Kontraktion bzw. Position eines thermischen Monofilament-Aktors (nutzbar bspw. als künstliche Muskelfaser) mit Messungen von  $U$  und  $I$  zwecks Positionsregelung [2]
- Schätzung des Ladestands von Li-Ion-Zellen mit Messungen von  $U$  und  $I$  während des (Ent-)Ladens [3]
- Schätzung des el. Rotorwinkels in permanentmagnet-erregten Synchronmotoren mit Messungen von  $u_{a,b,c}$  und  $i_{a,b,c}$  bei gleichzeitiger Nutzung des geschätzten Winkels zur Kommutierung/Regelung (WIP)
- Schätzung von Zylinderposition/-geschwindigkeit und den beiden Drücken in einem doppeltwirkenden Hydraulikzylinder mit Wegmessungen des Zylinders und des Ventilkolbens (4/3-Wege-Servoventil) [4]
- Schätzung der Totzeit zwischen zwei verrauschten, periodischen Signalen (Periodendauer  $>$  Totzeit) mit Methoden, die von der fraktionalen Infinitesimalrechnung inspiriert sind [5]
- Schätzung des Stör-/Lastmoments eines DC-Motors mit Messungen von Drehzahl,  $U$  und  $I$ , um durch Kompensation den Entwurf einer neuartigen adaptiven Gleitzustandsregelung zu ermöglichen [6]

Eine Erweiterung des Zustandsvektors mit Parametern ist allen zugrundeliegenden (E)KFs gemeinsam. In den meisten Projekten werden außerdem die Schätzwerte von Zuständen/Parametern für die Regelung verwendet.

## Literatur

- [1] Alexandra Mironova, Benedikt Haus, Andreas Zedler und Paolo Mercorelli: *Extended Kalman Filter for Temperature Estimation and Control of Peltier Cells in a Novel Industrial Milling Process*. IEEE Transactions on Industry Applications, akzeptiert zur Veröffentlichung, 2019.
- [2] Manuel Schimmack, Benedikt Haus und Paolo Mercorelli: *An Extended Kalman Filter as an Observer in a Control Structure for Health Monitoring of a Metal-Polymer Hybrid Soft Actuator*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 23(3):1477–1487, 2018.
- [3] Benedikt Haus und Paolo Mercorelli: *Polynomial Augmented Extended Kalman Filter to Estimate the State of Charge of Lithium-Ion Batteries*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, akzeptiert zur Veröffentlichung, 2019.
- [4] Benedikt Haus, Harald Aschemann und Paolo Mercorelli: *Tracking control of a piezo-hydraulic actuator using input-output linearization and a Cascaded Extended Kalman Filter structure*. Journal of the Franklin Institute, 355(18):9298–9320, 2018. Special Issue on Control and Signal Processing in Mechatronic Systems.
- [5] Benedikt Haus und Paolo Mercorelli: *An Extended Kalman Filter for Time Delays Inspired by a Fractional Order Model*. In: *Non-Integer Order Calculus and its Applications*, Band 496 der Reihe *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Seiten 151–163. Springer International Publishing, Cham, 2019.
- [6] Benedikt Haus, Paolo Mercorelli und Harald Aschemann: *Gain Adaptation in Sliding Mode Control Using Model Predictive Control and Disturbance Compensation with Application to Actuators*. Information, 10(5):182, 2019.



# Rekursive Kennfeld-Schätzung

Maik Gentsch

Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik  
TU Berlin  
maik.gentsch@tu-berlin.de

Rudibert King

Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik  
TU Berlin  
rudibert.king@tu-berlin.de

**Schlüsselwörter:** Rekursive Parameterschätzung, Zustandsschätzung, RLS, Regularisierung, modellgestützte Überwachung

In der modellbasierten Überwachung und der adaptiven Regelung werden unbekannte Parameter eines (physikalischen) Modells des Zielsystems während des Betriebs fortwährend geschätzt. Diese zu überwachenden Parameter werden meist als Konstanten angesehen, die sich nur aufgrund von zum Beispiel Alterungseffekten ändern können und dies mit einer Dynamik, die sehr viel träger als die Systemdynamik ist. Tatsächlich zeigen Parameter häufig eine ausgeprägte Abhängigkeit zum Betriebspunkt, die aufgrund unbekannter Zusammenhänge im Modell nicht berücksichtigt wird. Trifft dies zu und der Betriebspunkt ändert sich, dann variieren die Parameter mit einer ebenso schnellen Dynamik. Aufgrund der nun unzutreffenden Annahme von langsamen Parameteränderungen kommt es zu einer fehlerhaften Schätzung. Die Einstellung einer schnellen Parameterdynamik führt i.d.R. zu einem unerwünschten, da stark verrauschtem Schätzsignal. Über temporäre Phasen wäre dies sicherlich akzeptabel, sofern das Schätzverfahren in der Lage ist, die erfahrene Arbeitspunktabhängigkeit, das Kennfeld, zu erlernen, so dass beim nächsten Anfahren dieses Bereichs eine sichere, weniger verrauschte Schätzung gelänge. Abbildung 1 zeigt dieses Prinzip mit zeitlich abnehmender Adaptionfähigkeit, da Arbeitspunkte wiederholt angefahren werden (im dynamischen Betrieb).

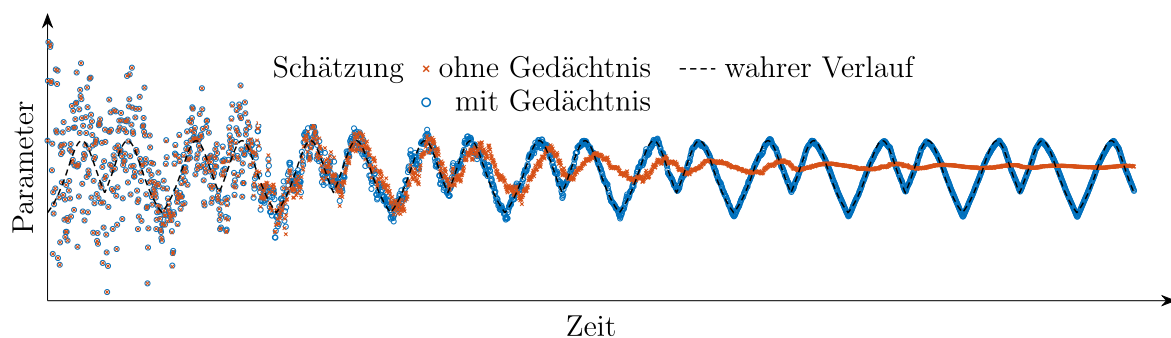


Abbildung 1: Konventionelle und Kennfeld-lernende Parameter-Schätzung

Für ein solches „Gedächtnis“ werden in diesem Beitrag Interpolanten mit adaptiven Stützpunkten verwendet. Es gilt dann, diese Stützpunkte rekursiv während des Betriebs zu schätzen. Für eine univariate Betriebspunkt-Abhängigkeit haben Höckerdal et. al. [2] einen stückweise linearen Interpolanten genutzt und dessen Stützpunkte mit einem Erweiterten Kalman Filter geschätzt. Jeder Stützpunkt stellt dabei einen zu schätzenden Parameter dar und es

kann gezeigt werden, dass immer nur zwei von ihnen beobachtbar sind, so dass Gegenmaßnahmen implementiert werden müssen, um die Divergenz des Filters zu verhindern. Ein weiterer Nachteil ist die numerische Komplexität dieses Ansatzes, die insbesondere bei einem flexiblen Kennfeld (viele Stützpunkte) oder komplexen Modellen die Echtzeitanwendung verhindert.

In diesem Beitrag wird ein alternatives Konzept vorgeschlagen, das deutlich weniger rechenintensiv ist. Für dieses Verfahren wird das modellgestützte Messverfahren, z.B. ein Sigma-punkt-Kalman-Filter [1], in Sequenz mit einer neu ausgearbeiteten, rekursiven Kennfeld-Schätzung eingesetzt. Verwendet werden univariate, stückweise lineare oder kubisch Hermite sowie bivariate, stückweise lineare Interpolanten als „Gedächtnis“. Als Beispiel wird die Überwachung/Schätzung von Verdichter- oder Turbinenkennfeldern betrachtet, siehe Abbildung 2.

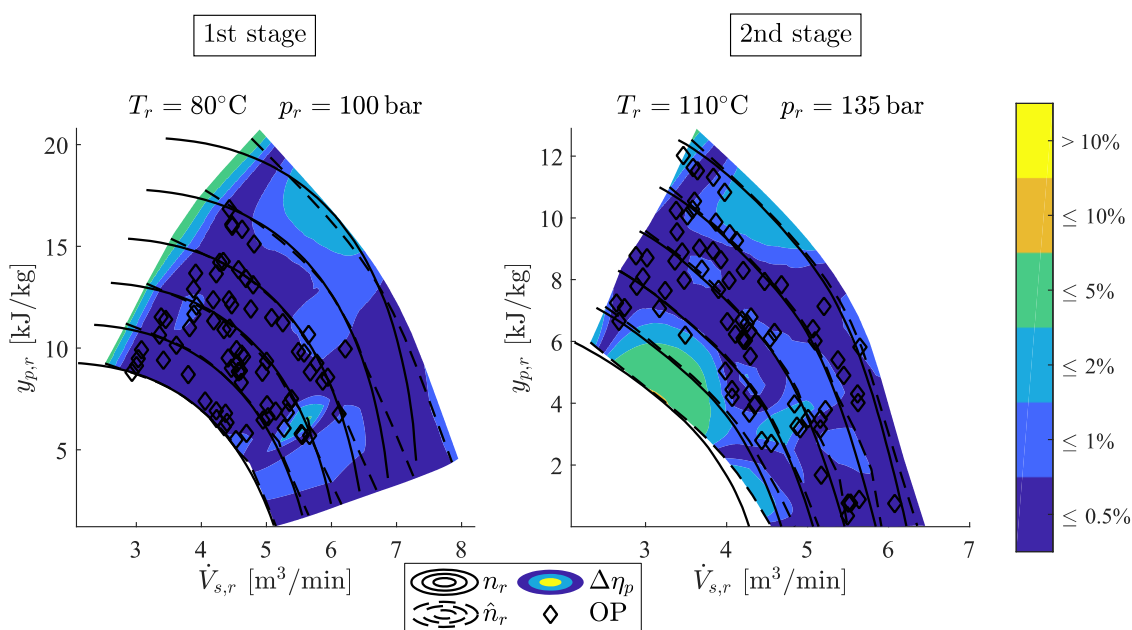


Abbildung 2: Überwachung eines zweistufigen Verdichters; Die Drehzahlkurven des nominellen Kennfelds sind durchgezogen und die Drehzahlkurven aus der aktuellen Schätzung sind gestrichelt dargestellt. Die Farben geben Level von Wirkungsgrad-Abweichungen zwischen nominellem und geschätztem Kennfeld an. OP sind historische Betriebspunkte.

## Literatur

- [1] S.J. Julier und J.K. Uhlmann. „Unscented Filtering and Nonlinear Estimation“. In: *Proceedings of the IEEE* 92(3): S. 401-422. 2014.
- [2] E. Höckerdal et al. „EKF-based adaptation of look-up tables with an air mass-flow sensor application“. In: *Control Engineering Practice* 19(5): S. 442-453. 2011.
- [3] M. Gentsch und R. King. „Real-time estimation of a multi-stage centrifugal compressor performance map considering real-gas processes and flexible operation“. Zur Veröffentlichung in *Journal of Process Control* angenommen.