

# Hybride Zustandsschätzung am Beispiel der Fahrdynamik eines Sattelzuges

Simon Ehlers

Institut für Mechatronische Systeme  
Leibniz Universität Hannover  
[simon.ehlers@imes.uni-hannover.de](mailto:simon.ehlers@imes.uni-hannover.de)

Thomas Seel

Institut für Mechatronische Systeme  
Leibniz Universität Hannover  
[thomas.seel@imes.uni-hannover.de](mailto:thomas.seel@imes.uni-hannover.de)

**Schlüsselwörter:** Zustands- und Parameterschätzung, Hybride Schätzmethoden, Sattelzug, Fahrdynamik, Beladungs- und Parametervariation

Physikalisch-modellbasierte Methoden zur Zustandsschätzung basieren auf aufwändiger physikalischer Modellierung, erfordern tiefes Systemverständnis, bieten jedoch physikalische Interpretierbarkeit und sind in einem großen (Zustands-)Bereich gültig. Datengetriebene Ansätze benötigen umfangreiche Daten, um komplexe Zusammenhänge abzubilden, erfordern jedoch kein tiefes Systemverständnis und sind auf die im Datensatz vorhandene Domäne beschränkt. Hybride Ansätze kombinieren diese Methoden, um ihre jeweiligen Vorteile zu vereinen.

In diesem Vortrag werden verschiedene Verfahren zur Zustandsschätzung an einem Sattelzug vorgestellt. Speziell der Sattelaufleger (Anhängler) ist hinsichtlich der verbauten Sensorik und der Rechenkapazität nur spärlich ausgestattet. Ferner ist die Kommunikation zwischen der Zugmaschine und dem Sattelaufleger auf die nötigsten Informationen beschränkt. Für (autonome) Assistenzsysteme werden jedoch Zustandsinformationen über den Sattelaufleger benötigt. Hierbei spielen fahrdynamische Informationen über den Sattelaufleger eine wichtige Rolle, da das Fahrverhalten und somit die Fahrsicherheit von dem Beladungszustand maßgeblich beeinflusst werden. Da eine direkte Messung der relevanten fahrdynamischen Zustände häufig wirtschaftlich nicht abbildbar und/oder technisch zu aufwändig ist, bietet sich eine Schätzung der Zustände als Alternative an.

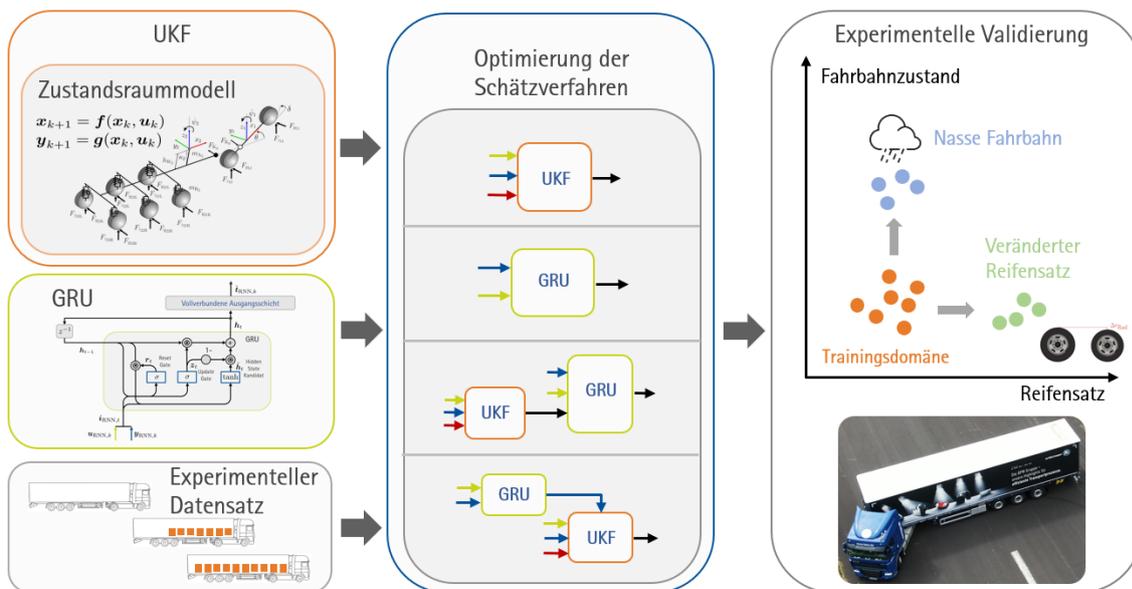


Abbildung 1: Hybride Verfahren zur Zustandsschätzung am Sattelaufleger

Die Schätzaufgabe besteht darin, nur auf Basis von Informationen aus dem Sattelaufleger die Zielgrößen Knickwinkel zwischen Zugmaschine und Sattelaufleger sowie die lateralen und vertikalen Reifenkräfte am Sattelaufleger zu schätzen. Dazu ist eine Schätzung der

Sattelauflegermasse und -schwerpunktposition bei unterschiedlichen Beladungen sowie der Eingangsgröße (Lenkwinkel der Zugmaschine) notwendig. Für das physikalisch-modellbasierte Schätzverfahren wird der Sattelaufleger als Zweispurmodell mit Wankdynamik modelliert und in einem Unscented Kalman-Filter (UKF) angewendet [1]. Der datenbasierte Ansatz basiert auf einem rekurrenten künstlichen neuronalen Netz mit interner Dynamik (speziell einer Gated Recurrent Unit, GRU). Aus den beiden Methoden werden zwei hybride Schätzverfahren kombiniert: In dem ersten hybriden Verfahren nutzt die GRU alle relevanten geschätzten Größen des UKF als Eingänge, um die Schätzung zu verbessern. Bei der zweiten hybriden Methode finden die geschätzten Größen der GRU Eingang in den Korrekturschritt des UKF [2], [3].

Zur Entwicklung, Optimierung und Validierung aller Schätzverfahren steht ein experimenteller Datensatz mit unterschiedlichen querdynamischen Manövern eines Versuchsfahrzeugs zur Verfügung. Dieser beinhaltet Messungen der relevanten Seriensensorik, DMS-basierte Messungen der Reifenkräfte, Knickwinkel- und Koppelkraftmessungen sowie eine hochgenaue Positions- und Geschwindigkeitsmessung für insgesamt drei unterschiedliche Beladungszustände (leer, teilbeladen und vollbeladen). Außerdem werden die Schätzverfahren außerhalb ihrer Trainingsdomäne bei unterschiedlicher Fahrbahnnaße und einem veränderten Reifensatz getestet.

## Literatur

- [1] S. F. G. Ehlers, Z. Ziaukas, J.-P. Kobler und H.-G. Jacob, „State and Parameter Estimation in a Semitrailer for Different Loading Conditions Only Based on Trailer Signals,“ *American Control Conference (ACC)*, p. 2353–2360, 2022.
- [2] S. F. G. Ehlers, K.-P. Kortmann und J.-P. Kobler, „Hybrid State Estimation in a Semitrailer for Different Loading Conditions,“ *22nd World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC WC 2023)*, pp. 5717-5722, 2023.
- [3] J.-H. Ewering, Z. Ziaukas, S. F. G. Ehlers und T. Seel, „Reliable State Estimation in a Truck-Semitrailer Combination Using an Artificial Neural Network-Aided Extended Kalman Filter,“ *2024 European Control Conference (ECC)*, pp. 456-463, 2024.

# Automatic Tuning of Extended Kalman Filter in Synchronous Reluctance Motor Drives with a Master-Slave Configuration

Saverio Rigon\*, Benedikt Haus\*\*, Paolo Mercorelli\*\* and Mauro Zigliotto\*

\*Department of Management and Engineering  
Università degli Studi di Padova, Vicenza, IT  
saverio.rigon@phd.unipd.it

\*\*Institute for Production Technology and Systems  
Leuphana Universität Lüneburg, Lüneburg, DE  
haus@leuphana.de

**Schlüsselwörter:** Adaptive Kalman Filter, Sensorless, Synchronous Reluctance Motor (SynRM), AC machines.

A substantial reduction in the human environmental footprint can be achieved through the use of more efficient motors, such as synchronous reluctance motors (SynRM). As low-cost motors, SynRMs are commonly employed in sensorless AC drives. Sensorless algorithms based on the Extended Kalman Filter (EKF) offer several advantages, but they require a time-consuming trial-and-error tuning procedure. This paper proposes the automatic tuning of the EKF through a second Kalman Filter (KF) in a master-slave (MS) configuration. The two KFs work concurrently: the first estimates the required quantities for machine control, and the second updates the process noise statistics of the first KF. The second KF is much easier to tune, requiring only one non-critical parameter. Experimental results confirm the validity of this approach.

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta} = R_s \mathbf{i}_{\alpha\beta} + \mathbf{A} \frac{d\mathbf{i}_{\alpha\beta}}{dt} + \omega_e (\mathbf{B} + \mathbf{C}) \mathbf{i}_{\alpha\beta} \quad (3)$$

Solving for the stator current dynamics, (3) yields

$$\frac{d\mathbf{i}_{\alpha\beta}}{dt} = \mathbf{A}^{-1} [\mathbf{u}_{\alpha\beta} - R_s \mathbf{i}_{\alpha\beta} - \omega_e (\mathbf{B} + \mathbf{C}) \mathbf{i}_{\alpha\beta}] \quad (4)$$

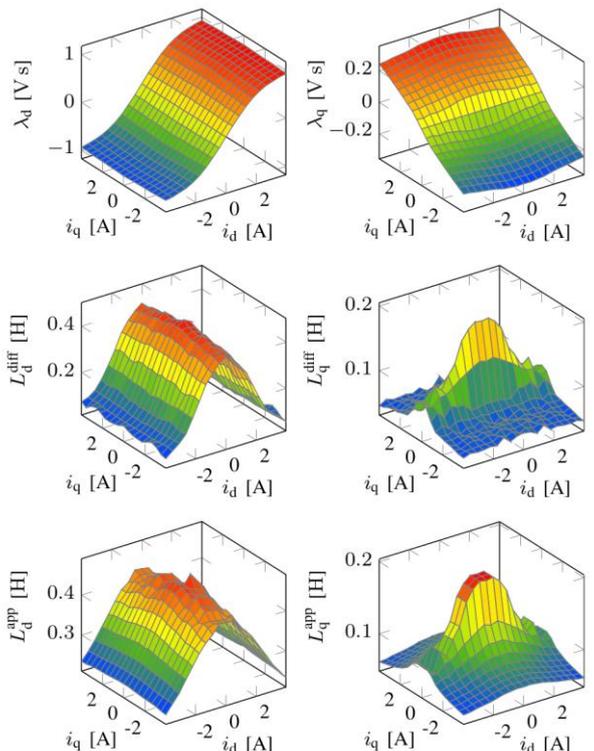
where  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  and  $\mathbf{C}$  are defined as

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} L_{\Sigma}^{\text{diff}} + L_{\Delta}^{\text{diff}} \cos(2\vartheta_e) & L_{\Delta}^{\text{diff}} \sin(2\vartheta_e) \\ L_{\Delta}^{\text{diff}} \sin(2\vartheta_e) & L_{\Sigma}^{\text{diff}} - L_{\Delta}^{\text{diff}} \cos(2\vartheta_e) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -L_{\Delta}^{\text{diff}} \sin(2\vartheta_e) & L_{\Sigma}^{\text{diff}} + L_{\Delta}^{\text{diff}} \cos(2\vartheta_e) \\ -L_{\Sigma}^{\text{diff}} + L_{\Delta}^{\text{diff}} \cos(2\vartheta_e) & L_{\Delta}^{\text{diff}} \sin(2\vartheta_e) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -L_{\Delta}^{\text{app}} \sin(2\vartheta_e) & -L_{\Sigma}^{\text{app}} + L_{\Delta}^{\text{app}} \cos(2\vartheta_e) \\ L_{\Sigma}^{\text{app}} + L_{\Delta}^{\text{app}} \cos(2\vartheta_e) & L_{\Delta}^{\text{app}} \sin(2\vartheta_e) \end{bmatrix} \quad (7)$$

and  $L_{\Sigma}^x = (L_d^x + L_q^x)/2$ ,  $L_{\Delta}^x = (L_d^x - L_q^x)/2$ , ( $x = \text{app, diff}$ ).



# Intervallbeobachtung reaktiver Zerstäubungsprozesse mit Parameterunsicherheiten

Fabian Schneider

Christian Wölfel

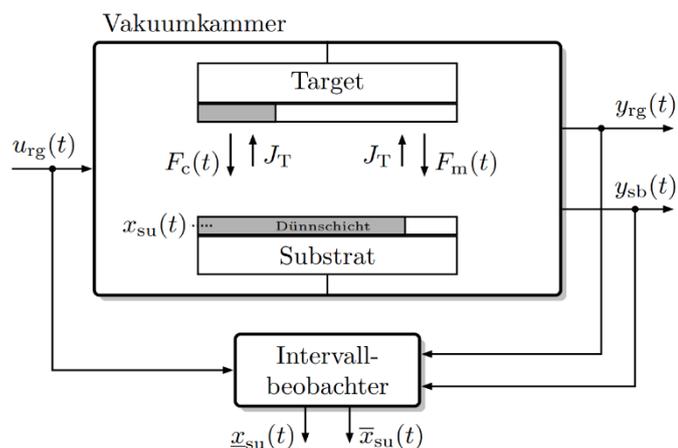
Alexander Fay

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik  
Ruhr-Universität Bochum  
{fabian.schneider-v8b, christian.woelfel, alexander.fay}@rub.de

**Schlüsselwörter:** Intervallbeobachter, Parameterunsicherheiten, qLPV-System

Reaktive Zerstäubungsprozesse dienen zur plasmabasierten Abscheidung von nanostrukturierten Dünnschichten. Typische Anwendungsfälle sind die Fertigung von optischen Schichten und Halbleitern.

Der Abscheidungsprozess findet in einer Vakuumkammer statt, wobei die Qualitätsgrößen des Prozesses nicht direkt gemessen werden können. Eine dieser nicht messbaren Qualitätsgrößen stellt die chemische Zusammensetzung der abgeschiedenen Dünnschicht in Form der Substratbedeckung  $x_{su}(t)$  dar (Abb. 1).



In diesem Vortrag wird ausgehend von der physikalischen Modellierung eine Brücke hin zum systematischen Entwurf von Beobachtersystemen für diese Prozessklasse gespannt. Ziel ist die Rekonstruktion der Substratbedeckung basierend auf dem Verlauf sekundärer Prozessgrößen trotz Parameterunsicherheiten. Der tatsächliche Prozesszustand soll dabei im Sinne eines Intervalls von den Zustandsverläufen des Beobachters eingeschlossen werden (Abb. 2).

Abbildung 1: Blockschaltbild mit Intervallbeobachter und reaktivem Zerstäubungsprozess: Ionen  $J_T$  werden mit der Spannung  $y_{sb}(t)$  beschleunigt und zerstäuben das Target, sodass Targetteilchen mit  $F_m(t)$ ,  $F_c(t)$ , auf dem Substrat abgelagert werden. Reaktivgas (Zufuhr  $u_{rg}(t)$ , Partialdruck  $y_{rg}(t)$ ) wird in der Dünnschicht gebunden.

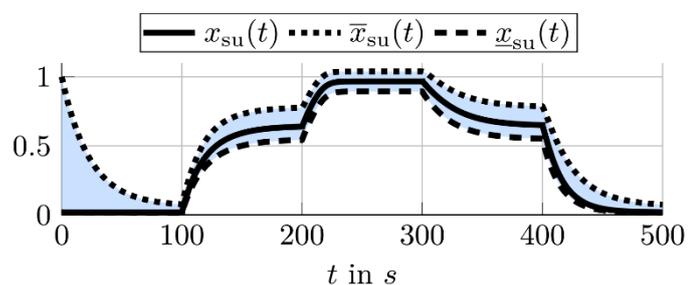


Abbildung 2: Substratzustand wird von erzeugten Intervallgrenzen eingeschlossen

Im ersten Teil des Vortrages wird die Klassifizierung des in der Literatur etablierten Prozessmodells [1, 2] als quasi-lineares parameter-variiertes (qLPV) System

$$\dot{x}(t) = A(p(t))x(t) + bu_{rg}(t)$$

abgeleitet und dessen Beobachtbarkeit [3] diskutiert. Dabei kennzeichnet  $p(t)$  einen aus den Messgrößen ermittelbaren Scheduling-Vektor. Das nichtlineare Prozessmodell charakterisiert

das instabile Verhalten und die wesentlichen Wirkprinzipien des Abscheideprozesses. Es enthält unsichere Parameter, welche sich auf die Wechselwirkung zwischen der Dünnschicht und dem Plasma beziehen.

In dem zweiten Teil des Vortrages wird eine Entwurfsmethode für einen robusten [4] Intervallbeobachter (Abb.1, unten) für die beschriebene Systemklasse vorgestellt. Das resultierende reduzierte Beobachtersystem erzeugt die Trajektorien  $\underline{x}_{su}(t)$ ,  $\bar{x}_{su}(t)$ , die den Substratzustand

$$x_{su}(t) \in [\underline{x}_{su}(t) \bar{x}_{su}(t)]$$

des unsicheren Prozesses garantiert einschließen (Abb. 2).

Ein entwickeltes Leitsystem [5] wurde genutzt, um die praktische Wirksamkeit der Entwurfsmethode experimentellen zu validieren. Hierbei wird das Beobachtungsergebnis mit ex-situ Messungen mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie von beschichteten Siliziumwafern verglichen.

## Literatur

- [1] S. Berg und T. Nyberg „Fundamental understanding and modelling of reactive sputtering processes“. In: *Thin Solid Films*, Bd. 476, Nr. 2, S. 215–230, 2005.
- [2] T. Kubart et al. „Dynamic behaviour of the reactive sputtering process“. In: *Thin Solid Films*, Bd. 515, Nr. 2, S. 421-424, 2006.
- [3] F. Schneider und C. Wölfel „Observability analysis and substrate state estimation of nonlinear reactive sputter processes“. In: *Proc. of the 24<sup>th</sup> International Conference on Process Control (PC)*, Štrbské Pleso, Slowakei, 2023.
- [4] F. Schneider und C. Wölfel. „Robust interval observer for substrate state estimation of nonlinear reactive sputter processes“. In: *Proc. of the 7<sup>th</sup> IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, Bridgetown, Barbados, 2023.
- [5] F. Schneider, C. Wölfel und A. Fay „Discrete event control for the automation of reactive sputter plants“. In: *Proc. of the 18<sup>th</sup> International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, Dubai, Vereinigte Arabische Emirate, 2024.

# Flachheit nichtlinearer zeitdiskreter Systeme - Ein Überblick

Johannes Schrotshamer

Institut für Regelungstechnik und  
Prozessautomatisierung  
Johannes Kepler Universität Linz  
johannes.schrotshamer@jku.at

Markus Schöberl

Institut für Regelungstechnik und  
Prozessautomatisierung  
Johannes Kepler Universität Linz  
markus.schoeberl@jku.at

**Schlüsselwörter:** Nichtlineare zeitdiskrete Systeme, Flachheit, exakte Linearisierung, Geometrische Methoden

Flache zeitkontinuierliche Systeme besitzen die charakteristische Eigenschaft, dass alle Systemgrößen durch einen flachen Ausgang und dessen Zeitableitungen ausgedrückt werden können. Der flache Ausgang hängt wiederum von den Systemgrößen und deren Zeitableitungen ab, wodurch sich eine Eins-zu-eins-Korrespondenz zwischen Lösungstrajektorien des Systems  $(x(t), u(t))$  und Trajektorien  $y(t)$  eines trivialen Systems mit  $\dim(y)=\dim(u)$  ergibt. Diese Eigenschaft ermöglicht eine elegante Trajektorienplanung sowie den systematischen Entwurf von Folgeregelungen für nichtlineare Systeme. Deswegen ist das Konzept der Flachheit für praktische Anwendungen von zentraler Bedeutung und bildet die Grundlage für zahlreiche Methoden der nichtlinearen Regelungstechnik.

In diesem Beitrag wird die Übertragung dieses Konzepts auf zeitdiskrete Systeme mit Hilfe differentialgeometrischer Betrachtungen behandelt, wofür es im Wesentlichen zwei Zugänge gibt.

Analog zur Flachheit zeitkontinuierlicher Systeme bezeichnen wir ein zeitdiskretes System als flach, wenn es eine Eins-zu-eins-Korrespondenz zwischen den Lösungstrajektorien des Systems  $(x(k), u(k))$  und Trajektorien  $y(k)$  eines trivialen Systems (siehe Abbildung 1) gibt. Bei diesem allgemeinen Ansatz darf der flache Ausgang sowohl von aktuellen und zukünftigen (Vorwärts-Shifts) als auch vergangenen Werten (Rückwärts-Shifts) der Systemgrößen abhängen, siehe [1, 2]. Für zeitdiskrete flache Systeme nach dieser Definition existiert zudem immer eine exakt linearisierende dynamische Zustandsrückführung.

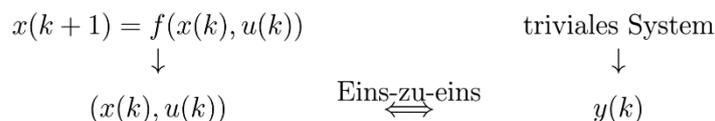


Abbildung 1: Eins-zu-eins-Korrespondenz

Ein anderer, in der Literatur häufig gewählter Zugang besteht darin, die Zeitableitungen der Systemgrößen aus der bekannten zeitkontinuierlichen Definition durch Vorwärts-Shifts zu ersetzen [3, 5]. Dieses Konzept der sog. Vorwärts-Flachheit, das sich auf aktuelle und zukünftige Werte einschränkt, stellt einen Spezialfall des ersten Ansatzes dar. Wir geben eine vollständige differentialgeometrische Charakterisierung für die Vorwärts-Flachheit von zeitdiskreten Systemen in Form von notwendigen und hinreichenden Bedingungen an. Der zugehörige Test basiert auf einer eindeutigen Sequenz von involutiven Distributionen und erweitert den be-

kannten Test für Eingangs-Zustands-Linearisierbarkeit [4]. Abschließend präsentieren wir einen dualen Test, der auf einer eindeutigen Sequenz von integrierbaren Kodistributionen beruht, siehe [6].

## Literatur

- [1] J. Diwold, B. Kolar und M. Schöberl. „A trajectory-based approach to discrete-time flatness“. In: *IEEE Control Systems Letters*, 6:289-294, 2022.
- [2] P. Guillot und G. Millérioux. „Flatness and submersivity of discrete-time dynamical systems“. In: *IEEE Control Systems Letters*, 4(2):337–342, 2020.
- [3] A. Kaldmäe and Ü. Kotta. „On flatness of discrete-time nonlinear systems“. In: *Proceedings 9th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS)*, 88–593, 2013.
- [4] B. Kolar, J. Diwold und M. Schöberl. „Necessary and sufficient conditions for difference flatness “. In: *IEEE Transactions on Automatic Control*, 68(3):1715-1721, 2023.
- [5] B. Kolar, A. Kaldmäe, M. Schöberl, Ü. Kotta and K. Schlacher. „Construction of flat outputs of nonlinear discrete-time systems in a geometric and an algebraic framework“. IN: *IFAC-PapersOnLine*, 49(18):796–801, 2016.
- [6] B. Kolar, J. Schrotshamer und M. Schöberl. „A dual geometric test for forward-flatness “. In: *arXiv e-prints*, 2024. arXiv:2404.02816 [math.OC].

# Robuste Optimierung für Trajektorienplanung und Folgeregelung

Dennis Gramlich

Lehrstuhl für Intelligente Regelungssysteme  
RWTH Aachen University  
christian.ebenbauer@ic.rwth-aachen.de

Christian Ebenbauer

Lehrstuhl für Intelligente Regelungssysteme  
RWTH Aachen University  
dennis.gramlich@ic.rwth-aachen.de

**Schlüsselwörter:** robuste Regelung, Trajektorienplanung, sequenziell konvexe Optimierung

In dieser Arbeit plädieren wir für den Einsatz von Methoden der robusten Optimierung zur Trajektorienplanung und Folgeregelung und zeigen deren Potential zur Verbesserung der Robustheit von Systemen auf. Die Generierung von Referenztrajektorien und Folgeregelungen ist eine grundlegende Aufgabe in der Regelungstechnik. Dieser Ansatz zur Lösung von Regelungsproblemen ist heute in der Industrie, von der Robotik bis zur Luft- und Raumfahrt, weit verbreitet. Der klassische Ansatz zur Trajektorienplanung und Folgeregelung besteht darin, zunächst ein *nominal* optimales Regelungsproblem zu lösen, um eine Referenztrajektorie zu generieren, und dann einen Folgeregler für diese Trajektorie zu entwerfen. Der resultierende Regler besteht dann aus einem Vorsteuerungsterm, um der Trajektorie zu folgen, und einem Rückführungsterm, um Störungen zu kompensieren. Selbst wenn der Rückführungsterm robust ausgelegt ist, werden Rückführungsterm und Vorsteuerungsterm nicht gemeinsam optimiert, um ein Maximum an Robustheit in der Trajektorienverfolgung zu erreichen. In dieser Arbeit sollen Methoden untersucht werden, die den Vorsteuerungsterm und den Rückführungsterm gemeinsam auf Robustheit optimieren, indem die Theorien und Algorithmen der robusten Regelung und der Trajektorienplanung zusammengeführt werden.

Die robuste Optimierung von Vorsteuer- und Rückführungstermen kann allgemein als robuste Optimierung von affinen Feedbackreglern für nichtlineare Systeme verstanden werden. Um dieses sehr anspruchsvolle Problem anzugehen, kombinieren wir lineare Matrixungleichungen und Multiplikatorrelaxationen aus der robusten Regelung [3] mit sequenzieller konvexer Programmierung für nichtlineare Trajektorienoptimierung [2]. Es ist nicht überraschend, dass dies zu einem sehr großen und anspruchsvollen Optimierungsproblem führt. Um die rechnerischen Herausforderungen zu bewältigen, zeigen wir, wie Ideen zur Strukturausnutzung aus der Differentiellen Dynamischen Programmierung [2] und aus KYP-SDP Lösern [1] kombiniert werden können, um robuste Trajektorienoptimierungsprobleme effizient zu lösen. Schließlich demonstrieren wir die verbesserte Robustheit durch robuste Trajektorienoptimierung in einer großen Simulationsstudie über Präzisionslandungen mit autonomen Parafoils.

## Literatur

- [1] D. Gramlich, T. Holicki, C. W. Scherer, and C. Ebenbauer. „A structure exploiting SDP solver for robust controller synthesis.” In: IEEE Control Systems Letters, 2023.
- [2] D. Gramlich, C. W. Scherer, and C. Ebenbauer. „Robust differential dynamic programming.” In: 2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC)
- [3] D. Gramlich, C. Scherer, H. Häring, and C. Ebenbauer. "Synthesis of constrained robust feedback policies and model predictive control." In 2024 European Control Conference (ECC)

# Zum Steuerungsentwurf für ein schweres Seil ohne Last

Daniel Gerbet

Institut für Regelungs- und  
Steuerungstheorie  
TU Dresden  
daniel.gerbet1@tu-dresden.de

Nicolas René Bachmann

Institut für Regelungs- und  
Steuerungstheorie  
TU Dresden

Klaus Röbenack

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

**Schlüsselwörter:** verteiltparametrische Systeme, Steuerungsentwurf, numerische Verfahren

Die Bewegung eines schweren Seils lässt sich durch ein hyperbolisches System von partiellen Differentialgleichungen beschreiben. Dieses System ist differentiell flach, und die Position  $y$  des nichtaktuerten Seilendes bildet einen flachen Ausgang. Somit kann für die Bewegung dieses Seilendes eine beliebige, hinreichend glatte Trajektorie  $t \mapsto y(t)$  vorgegeben, und daraus die Trajektorie  $t \mapsto u(t)$  für das aktuierte Seilende berechnet werden. Diese Aufgabe ist als Steuerungsproblem bekannt, und entspricht der Lösung eines Anfangswertproblems.

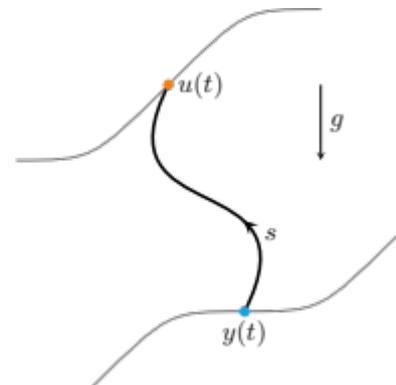


Abbildung 1: Schweres Seil

Im Falle linearer Differentialgleichungen lässt sich die Lösung leicht bestimmen. Für nichtlineare Systeme kann die Lösung numerisch berechnet werden [1].

Die Differentialgleichungen, welche die Bewegung des Seils beschreiben, sind jedoch zum einen nichtlinear, und zum anderen degeneriert der Charakter am ungesteuerten Rand, falls dort keine Kraft angreift. Dies hat zur Folge, dass die charakteristischen Projektionen in der Nähe des Randes zunehmend parallel verlaufen, und die Entkopplungstransformation dort singular ist. Daher kann die Methode aus [1], die auf dem expliziten Eulerverfahren beruht, nicht direkt angewandt werden - zumindest nicht in der Nähe des Randes.

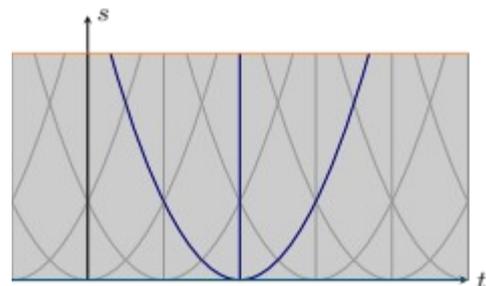


Abbildung 2: Lösungsgebiet und charakteristische Projektionen

Allerdings können die charakteristischen Projektionen, deren Verlauf wiederum von der Lösung abhängt, stückweise durch Parabeln angenähert werden. Durch eine geeignete Entwicklung der entkoppelten Größen in der Nähe des problematischen Randes lassen sich diese schließlich entlang ihrer Charakteristiken integrieren [2].

## Literatur

- [1] T. Knüppel und F. Woitteneck. „Control Design for Quasi-Linear Hyperbolic Systems With an Application to the Heavy Rope, “. In: *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2015.

- [2] N. R. Bachmann. „Steuerungsentwurf für das schwere Seil als Beispiel eines degeneriert parabolischen Systems“. *Diplomarbeit*. 2024.

# Cyber-Risikoanalyse industrieller Regelungssysteme

Dina Mikhaylenko \*

Ping Zhang \*\*

\* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik  
RPTU Kaiserslautern-Landau  
Erwin-Schrödinger Str. 12, 67663 Kaiserslautern  
Tel. 0631 2054310  
mikhaylenko@eit.uni-kl.de

\*\* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik  
RPTU Kaiserslautern-Landau  
Erwin-Schrödinger Str. 12, 67663 Kaiserslautern  
Tel. 0631 2055543  
ping.zhang@rptu.de

**Schlüsselwörter:** Cyber Security, Angriffsmodellierung, vernetzte Systeme, lokaler Covertangriff, Spiegelangriff, Sicherheitsindex

Die digitale Transformation in der Industrie führt zu einer zunehmenden Vernetzung der Systemkomponenten wie Sensoren, Aktoren und Regler in Produktionsanlagen. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für fortschrittliche Regelungskonzepte, bringt jedoch auch zusätzliche Risiken mit sich. In den vergangenen Jahren gab es vermehrt Cyberangriffe auf industrielle Regelungssysteme (engl. Industrial Control Systems, ICS) wie z.B. Stuxnet (2010), Irongate (2015), Crashoverride (2016), Triton (2017) und FrostyGoop (2024). Eine Analyse des Cyberrisikos ermöglicht den Betreibern und Herstellern von ICS, die Prozessschwäche frühzeitig zu erkennen, ein gesteigertes Sicherheitsbewusstsein im Arbeitsalltag zu entwickeln und Gegenmaßnahmen zur Reduzierung des Cyberrisikos zu ergreifen.

Unter den verschiedenen Typen von Cyberangriffen auf ICS sind die sogenannten *heimlichen Angriffe* (engl. stealthy attacks) besonders gefährlich, da solche Angriffe aktiv versuchen, den Einfluss des Angriffs zu verschleiern und die Erkennung durch die konventionelle Anomaliedetektion oder Fehlerdiagnose zu umgehen. Typische Beispiele sind Replayangriffe, Covertangriffe oder Nulldynamikangriffe [1].

In der industriellen Praxis wurde die Gefahr von heimlichen Angriffen bisher jedoch immer noch unterschätzt. Es wurde oft angenommen, dass komplexe Cyberangriffe, wie z.B. Covertangriffe, nicht sehr wahrscheinlich sind, da ein Covertangriff einen vollständigen Schreibzugriff auf alle Stellgrößen und Sensorsignale benötigt und auch ein genaues Prozessmodell braucht, um den Einfluss des Angriffs auf die Sensorsignale berechnen und anschließend kompensieren zu können (siehe Abbildung 1a). Es wird in diesem Vortrag aufgezeigt, dass es dem Angreifer möglich ist, trotz eingeschränkter Zugriffsrechte auf bestimmte Signale oder eines ungenauen Prozessmodells einen Angriff heimlich durchzuführen.

In diesem Vortrag wird das Risiko heimlicher Cyberangriffe auf ICS systematisch untersucht. Nach der Vorstellung zweier neuer Typen von heimlichen Angriffen wird ein Sicherheitsindex eingeführt, der eine quantitative Bewertung des Risikoniveaus ermöglicht. Basierend darauf wird ein Verfahren zur Ermittlung schutzbedürftiger Signale in einem ICS vorgestellt, um das Cyberrisiko präventiv zu minimieren. Alle Ergebnisse werden anhand der Experimente auf dem Drei-Tank-System validiert.

Der Vortrag beginnt mit der Vorstellung eines **heimlichen lokalen Covertangriffs**, in dem der Angreifer nur einen Teil der Stellgrößen und Sensorsignale manipulieren kann (siehe Abbildung 1b). Es wird gezeigt, dass ein Angreifer einen heimlichen lokalen Covertangriff durch die Anwendung der Entkopplungsregelung oder durch eine

Kombination der Grundideen vom Covert- und Nulldynamikangriff bewerkstelligen kann. Es wird vor allem risikoreich, wenn die Anzahl der manipulierbaren Stellgrößen größer als die Anzahl der nicht manipulierbaren Sensorsignale ist, da in diesem Fall ein heimlicher lokaler Covertangriff immer möglich ist. Darüber hinaus wird die Erreichbarkeit der Angriffsziele im Fall eines heimlichen lokalen Coverangriffs untersucht, die im Wesentlichen von der Ausgangssteuerbarkeit abhängt.

Im zweiten Teil des Vortrags wird ein **heimlicher Spiegelangriff** vorgestellt, in dem die Kommunikation zwischen der Anlage und dem Regler unterbrochen wird und die Sensorsignale durch die simulierten Werte ersetzt werden (siehe Abbildung 1c). Es wird gezeigt, dass wenn das Prozessmodell ungenau ist, der Angreifer anhand eines erweiterten Kalman-Filters den Spiegelangriff unbemerkt durchführen kann.

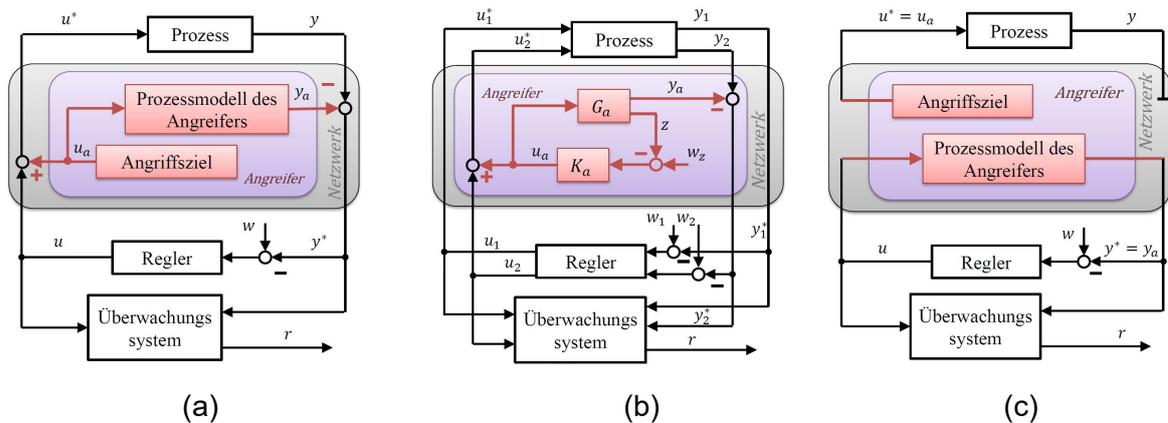


Abbildung 1: Schematische Darstellung der heimlichen Angriffe (a) Covertangriff; (b) lokaler Covertangriff; (c) Spiegelangriff

Ferner wird ein **Sicherheitsindex** eingeführt, um das Gesamtrisiko gezielter lokaler Covertangriffe in einem ICS zu quantifizieren. Darüber hinaus wird ein Ansatz zur Identifizierung besonders zu schützender Signale vorgestellt, um das Risiko solcher gezielter lokalen Covertangriffe zu minimieren [3].

## Literatur:

- [1] M. D. Firoozjaei, N. Mahmoudyar, Y. Baseri, A. A. Ghorbani. *An evaluation framework for industrial control system cyber incidents*. International Journal of Critical Infrastructure Protection, Vol. 36, 2022.
- [2] D. Mikhaylenko, P. Zhang. *Stealthy local covert attacks on cyber-physical systems*. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 67, No. 12, pp. 6778 - 6785, 2022.
- [3] D. Mikhaylenko, P. Zhang. *Stealthy targeted local covert attacks on cyber-physical systems*. Automatica, 173 (112023), 2025.
- [4] D. Mikhaylenko, P. Zhang. *Robust mirror attacks on cyber-physical systems*. Proceedings of the 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), pp. 1185 - 1190, Valetta, Malta, 2024.

# Stabilitätsuntersuchung für Umrichter am schwachen Netz

Alexander Schöley

Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Universität Rostock  
alexander.schoeley@uni-rostock.de

Torsten Jeinsch

Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Universität Rostock  
torsten.jeinsch@uni-rostock.de

**Schlüsselwörter:** netzseitiger Umrichter, PLL-basierte Netzsynchro- nisation, Stabilitätsunter- suchung

Der Bedarf an elektrischer Energie wird in zunehmendem Maße mit Energie aus nichtfossilen Quellen, z.B. mit Wind- und Solarenergie, gedeckt. Im Gegensatz zu konventionellen Kraft- werken erfolgt die Einspeisung der Energie in das Versorgungsnetz dabei nicht durch direkt an das Netz gekoppelte Synchronmaschinen, sondern nach einem anderen Prinzip durch leis- tungselektronische Umrichtersysteme. Damit ein Umrichter eine geeignete Ausgangsspan- nung erzeugen und so Energie einspeisen kann, ist eine Synchronisation mit dem Netz erfor- derlich. Bei einer netzfolgenden Umrichterregelung hat sich für diese Aufgabe die Verwendung einer Phasenregelschleife (PLL) als Standard etabliert, die aus der gemessenen Netzspan- nung die aktuelle Phasenlage des Netzes ermittelt und sie der Regelung zur Verfügung stellt.

An einem schwachen Netzanschlusspunkt weicht die gemessene Spannung aber in nicht zu vernachlässigender Weise von der Netzspannung ab (s. Abb. 1). In diesem Fall besteht das Risiko, dass der Informationsgehalt des Messsignals für die Netzsynchro- nisation nicht mehr ausreicht, wodurch der PLL-Phasenwinkel divergiert und der Verlust der Netzsynchro- nität eintritt. In der Folge erzeugt der Umrichter ungeeignete Ausgangsspannungen und wird notab- geschaltet, da ansonsten Beschädigungen aufgrund von hohen Stromamplituden resultieren. Ein Verlust der Netzsynchro- nität wird daher in dieser energietechnischen Anwendung als In- stabilität aufgefasst.

Im Vortrag wird die Sta- bilität der Netzsynchro- nisation anhand eines transienten Übergangs von einem Umrichterar- beitspunkt zu einem zweiten untersucht und ein Kriterium zum Nach- weis der Stabilität be- züglich des PLL-Pha- senwinkels entwickelt.

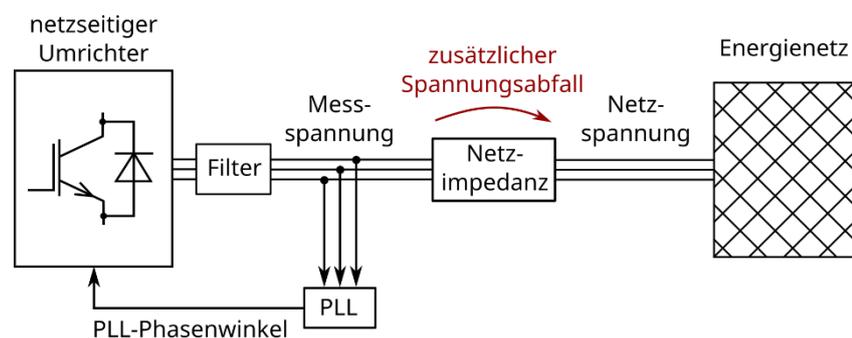


Abbildung 1: Funktionale Darstellung des untersuchten Systems

Die Grundlage des Stabilitätsnachweises ist die Ermittlung einer kritischen Phasenlage für den betrachteten transienten Übergang, bei deren Überschreiten der PLL-Phasenwinkel di- vergiert. Die kritische Phase stellt daher eine obere Schranke für die Stabilität der Netzsyn-

chronisation dar. Auf der Basis von Vereinfachungen des Systems wird das maximale Überschwingen des PLL-Phasenwinkels für den transienten Übergang konservativ abgeschätzt und der Nachweis erfolgt durch einen Vergleich mit dem kritischen Phasenwinkel.

Trotz der vorgenommenen Vereinfachungen berücksichtigt das Nachweiskriterium Nichtlinearitäten des Systems, wodurch es aber nicht analytisch geschlossen ausgewertet werden kann. Stattdessen erfolgt die Implementation des Kriteriums durch eine numerische Optimierung unter Nebenbedingungen. Aufgrund der getroffenen konservativen Vereinfachungen ist der Stabilitätsnachweis lediglich hinreichend. An Beispielen wird das Kriterium in verschiedenen Situationen betrachtet.

## Literatur

- [1] J. Rocabert, J. Luna, F. Blaabjerg, P. Rodríguez. „Control of Power Converters in AC Microgrids“. In: IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, no. 11, 2012
- [2] L. Huang et al. “Grid-Synchronization Stability Analysis and Loop Shaping for PLL-Based Power Converters With Different Reactive Power Control”. In: IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 11, no. 1, 2020
- [3] A. Schöley, T. Jeinsch, „Small-Signal and Transient Stability Investigation of Inverter Grid Synchronization“. In: 2023 27th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC), 2023
- [5] A. Schöley, T. Jeinsch. „A Criterion for the Transient Stability of the PLL-based Grid Synchronization“. In: 28th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2024

# Automatisierte Beatmung durch Stimulation des Nervus Phrenicus bei künstlicher Beatmung

Arnhold Lohse

Lehrstuhl für medizinische Informationstechnik  
RWTH Aachen Universität  
lohse@hia.rwth-aachen.de

Steffen Leonhardt

Lehrstuhl für medizinische Informationstechnik  
RWTH Aachen Universität  
leonhardt@hia.rwth-aachen.de

**Schlüsselwörter:** Nervus Phrenicus Stimulation, Physiologische Regelung, Künstliche Beatmung, Robuste Regelung

Die mechanische Beatmung wird zur Behandlung von Patienten mit Ateminsuffizienz auf der Intensivstation eingesetzt. Nach erfolgreicher Behandlung der zugrundeliegenden Ateminsuffizienz werden die Patienten in der Regel entwöhnt [1], wobei diese spontan atmen, insbesondere um die Atemmuskulatur zu stärken. Ein Risiko der mechanischen Beatmung ist jedoch die beatmungsinduzierte Zwerchfelldysfunktion (*ventilator induced diaphragmatic dysfunction*, VIDD) [2], bei der Patienten eine Zwerchfellatrophie (Verkümmerung) entwickeln, was sich auf die Entwöhnung auswirkt [3]. Wenn die Atemkraft eines Patienten für eine adäquate Atmung unzureichend ist, führt dies zu einem Versagen der Entwöhnung, das wiederum zu verlängerten Krankenhausaufenthalten und geringeren Überlebensraten führt [4].

Ein vielversprechender Ansatz zur VIDD-Vermeidung ist die Stimulation des Nervus Phrenicus (Zwerchfellnerv), wodurch künstliche Zwerchfellkontraktionen ausgelöst werden und somit die Zwerchfellaktivität aufrechterhalten. Für die klinische Anwendung auf der Intensivstation ist ein geregeltes Automatisierungssystem, das die Stimulationseinstellungen anpasst, um die gewünschte Beatmung zu erreichen, unerlässlich. Es wurden verschiedene Regelungsstrategien für rein mechanische Beatmung entwickelt, die z. B. den end-tidalen  $\text{CO}_2$ -Partialdruck, dem  $\text{CO}_2$ -Partialdruck am Ende der Ausatmung, regeln [5], aber wenige Regelkonzepte zur automatisierten Stimulation des Nervus Phrenicus wurden veröffentlicht.

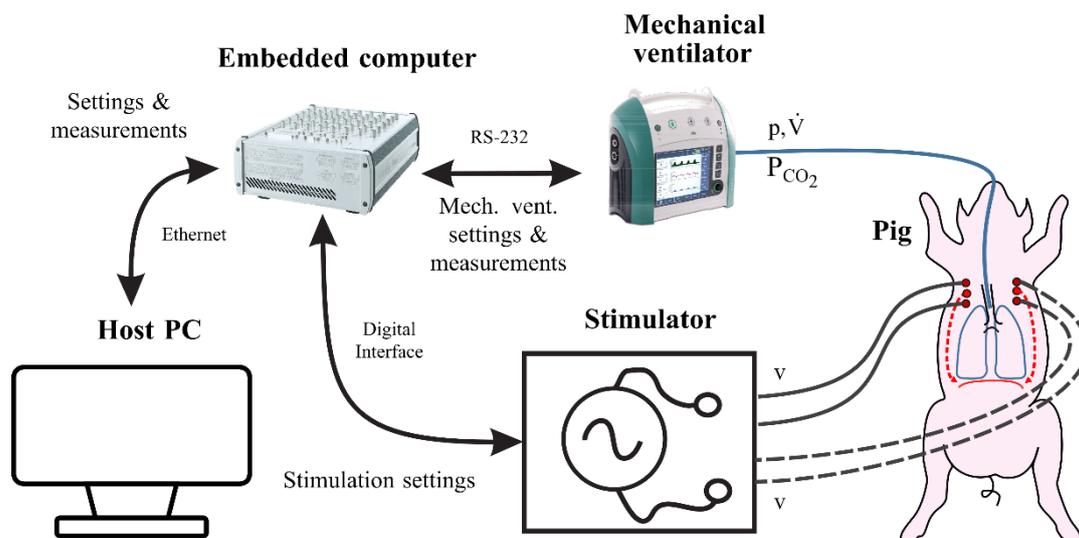


Abbildung 1: Experimenteller Aufbau Nervus Phrenicus Stimulation. Die dargestellten Messwerte sind der end-tidale  $\text{CO}_2$ -Partialdruck  $P_{\text{CO}_2}$ , der Atemwegsdruck  $p$ , der Volumenfluss  $\dot{V}$  und die Stimulationsspannung  $v$  (adaptiert von [6]).

In Abb. 1 ist der experimentelle Aufbau zu sehen. Der Nutzer bedient über einen Host PC einen eingebetteten Computer (dSPACE GmbH, Paderborn, Deutschland), der mit einem modifizierten Beatmungsgerät (EVE IN, Fritz Stephan GmbH, Gackebach, Deutschland) und einem eigengebauten Stimulator kommuniziert. Der Stimulator gibt Spannungspulse an Elektroden, die in der Nähe des linken und rechten Nervus Phrenicus platziert werden, die eine Zwerchfellkontraktion induzieren. Das Beatmungsgerät kann bei Bedarf durch Steigerung des Atemwegdrucks eine adäquate Beatmung gewährleisten.

Dieser Vortrag stellt für diesen experimentellen Aufbau das Regelsystem vor, während dessen Entwicklung die Anwendung auf der Intensivstation fokussiert wurde. Über eine kaskadierte Struktur wird der end-tidale CO<sub>2</sub>-Partialdruck durch das Minutenvolumen und dem Tidalvolumen, das pro Atemzug ein- und ausgeatmet wird, geregelt. Die Regler wurden mittels robuster H-unendlich-Synthese entworfen und anschließend in Simulationen mit variablen Patientenzuständen und möglichen Ereignissen auf der Intensivstation validiert. Weiterhin wurde das Regelsystem in Schweinen mit 96 Stunden langen Versuchen validiert.

Das Regelsystem erwies sich sowohl in den Simulationen als auch in den Tierversuchen als robust gegenüber Störgrößen und variablen Körperzuständen und kann zur weiteren Entwicklung von Regelsystemen der Nervus Phrenicus Stimulation auf der Intensivstation genutzt werden.

## Literatur

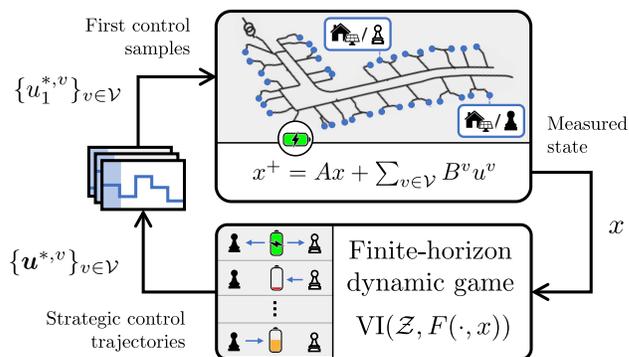
- [1] J.-M. Boles et al. „Weaning from mechanical ventilation“. In: *The European Respiratory Journal*. DOI: 10.1183/09031936.00010206. 2007.
- [2] S. N. A. Hussain et al. „Mechanical ventilation-induced diaphragm disuse in humans triggers autophagy“. In: *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. DOI: 10.1164/rccm.201002-0234OC. 2010.
- [3] M. Dres et al. „Coexistence and impact of limb muscle and diaphragm weakness at time of liberation from mechanical ventilation in medical intensive care unit patients“. In: *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. DOI: 10.1164/rccm.201602-0367OC. 2017.
- [4] F. C. Trudzinski et al. „Risk Factors for Prolonged Mechanical Ventilation and Weaning Failure: A Systematic Review“. In: *Respiration*. DOI: 10.1159/000525604. 2022.
- [5] J.-O. Hahn et al. „System Identification and Closed-Loop Control of End-Tidal CO<sub>2</sub> in Mechanically Ventilated Patients“. In: *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*. DOI: 10.1109/TITB.2012.2204067. 2012.
- [6] A. Lohse et al. „Evaluation of electric phrenic nerve stimulation patterns for mechanical ventilation: A pilot study“. In: *Scientific Reports*. DOI: 10.1038/s41598-023-38316-1. 2023.

# Receding Horizon Games for Dynamic Resource Allocation Problems

Sophie Hall, Florian Dörfler

Automatic Control Laboratory, ETH Zürich, Switzerland,  
{shall, dorfler}@ethz.ch

**Keywords:** game theory, model predictive control (MPC), input-to-state stability



**Fig. 1.** In RHG, control actions are generated by solving a finite-horizon dynamic game, in a receding-horizon fashion.

Our modern society is underpinned by a multitude of shared infrastructure and resources (e.g., traffic networks, power grids, and fish stocks). These systems and resources need to be carefully managed; if left unchecked, selfish behavior by users can lead to severe societal losses. In addition, in large scale infrastructure problems, decisions need to be made in real-time through control algorithms. Yet, controlling shared infrastructure and allocating resources in real-time is a challenging problem. One of the only systematic and tractable control frameworks for systems with these properties is Economic Model Predictive Control (EMPC) as it allows for general economic objectives and constraints as well as for distributed implementations [1]. However, EMPC implicitly assumes that agents accessing the shared resources are willing to cooperate to achieve a socially-optimal outcome which is an unreasonable assumption. Game-theory comes as a powerful tool for modeling conflict and cooperation between self-interested decision makers but existing works oftentimes solve for open-loop policies which are not robustness against disturbances and model mismatch. One approach to introduce feedback is to solve the game in a receding-horizon fashion, measuring the state and recomputing the open-loop trajectory at every sampling time, à la MPC, as shown in Figure 1.

The combination of MPC and game theory, also called Receding Horizon Games (RHG) [2] or Game-Theoretic Planning [3, 4], allows to handle systems with dynamics, constraints, and self-interested agents. This control paradigm has been successfully employed in various engineering applications, including supply chains [5], robotics [6], autonomous driving [4, 7, 8], electric vehicle charging [9], and smart grids [2, 10].

This talk will present Receding Horizon Games, and we will focus on three key aspects: (i) Motivate this novel control paradigm through dynamic resource allocation problems, using applications in energy and groundwater management; (ii) Present the general RHG framework and its solution concept based on variational Generalized Nash Equilibria, which ensure both strategic stability and

economic fairness in resource allocation, (iii) Introduce the first formal stability analysis of RHG using dissipativity theory and monotone operator methods, extending beyond potential games, providing numerically verifiable certificates [11].

## References

1. Matthias A. Müller and Frank Allgöwer. Economic and distributed model predictive control: Recent developments in optimization-based control. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 10(2):39–52, March 2017.
2. Sophie Hall, Giuseppe Belgioioso, Dominic Liao-McPherson, and Florian Dorfler. Receding horizon games with coupling constraints for demand-side management. In *2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 3795–3800, 2022.
3. Riccardo Spica, Eric Cristofalo, Zijian Wang, Eduardo Montijano, and Mac Schwager. A real-time game theoretic planner for autonomous two-player drone racing. *IEEE Trans. Robot.*, 36(5):1389–1403, October 2020.
4. Mingyu Wang, Zijian Wang, John Talbot, J. Christian Gerdes, and Mac Schwager. Game-theoretic planning for self-driving cars in multivehicle competitive scenarios. *IEEE Transactions on Robotics*, pages 1–13, 2021.
5. Sophie Hall, Laura Guerrini, Florian Dörfler, and Dominic Liao-McPherson. Game-theoretic model predictive control for modelling competitive supply chains. *arXiv preprint arXiv:2401.09853*, 2024.
6. Dongbing Gu. A differential game approach to formation control. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 16(1):85–93, January 2008.
7. Alexander Liniger and John Lygeros. A noncooperative game approach to autonomous racing. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 28(3):884–897, May 2020.
8. Simon Le Cleac’h, Mac Schwager, and Zachary Manchester. Algames: a fast augmented lagrangian solver for constrained dynamic games. *Autonomous Robots*, 46(1):201–215, 2022.
9. Nicola Mignoni, Raffaele Carli, and Mariagrazia Dotoli. Distributed noncooperative mpc for energy scheduling of charging and trading electric vehicles in energy communities. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 31(5):2159–2172, 2023.
10. Antonio De Paola, Filiberto Fele, David Angeli, and Goran Strbac. Distributed coordination of price-responsive electric loads: A receding horizon approach. In *2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. IEEE, dec 2018.
11. Sophie Hall, Dominic Liao-McPherson, Giuseppe Belgioioso, and Florian Dörfler. Stability Certificates for Receding Horizon Games. April 2024.

# Ein sensitivitätsbasierter Ansatz für die verteilte modellprädiktive Regelung nichtlinearer Systeme

Maximilian Pierer von Esch

Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg  
maximilian.v.pierer@fau.de

Knut Graichen

Lehrstuhl für Regelungstechnik  
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg  
knut.graichen@fau.de

**Schlüsselwörter:** Multi-Agenten-Systeme, verteilte Optimierung, verteilte modellprädiktive Regelung, nichtlineare Systeme

Die modellprädiktive Regelung (engl.: Model Predictive Control, MPC) hat sich als eine effektive Strategie zur Regelung linearer und nichtlinearer Systeme erwiesen, insbesondere bei der Umsetzung komplexer Regelziele unter Einhaltung von Beschränkungen. In vernetzten und möglicherweise hochskaligen Multi-Agenten-Systemen, wie beispielsweise Energiesystemen [1] oder Roboterschwärmen [2], ist ein zentraler MPC-Ansatz oft weniger geeignet. Gründe dafür sind begrenzte Rechenressourcen, Skalierbarkeitsprobleme oder das Fehlen einer zentralen Infrastruktur. Diese Herausforderungen und der Trend zu dezentralen Regelarchitekturen haben zu der Entwicklung der verteilten modellprädiktiven Regelung (engl.: Distributed MPC, DMPC) geführt. Statt eines zentralen Reglers sind lokale MPC-Regler zuständig für die Regelung einzelner Teilsysteme. Vorrangig haben sich sogenannte kooperative Ansätze als praktikabel erwiesen [3]. Hierbei wird zunächst ein zentrales Optimierungsproblem formuliert und daraufhin mittels geeigneter Optimierungsalgorithmen auf Agentenebene in jedem Abtastzeitschritt verteilt gelöst. DMPC bietet somit eine skalierbare Alternative zu zentralen Ansätzen, da dieselbe Regelgüte wie im zentralen Fall erreicht werden kann und Eigenschaften wie nominelle Stabilität erhalten bleiben, wenn die Teillösungen hinreichend schnell und genau zur zentralen Lösung konvergieren.

Zur Umsetzung dieser kooperativen DMPC-Ansätze werden daher rechen- und kommunikationseffiziente Algorithmen benötigt, die sich auch für nichtlineare bzw. nicht-konvexe Probleme eignen. Ein Großteil der DMPC-Anwendungen beruht auf einer Dekomposition des dualen Problems, wobei Kopplungen mittels Konsensusbeschränkungen und zusätzlichen lokalen Kopien der gekoppelten Größen berücksichtigt werden. Hervorzuheben ist hierbei beispielsweise der ADMM-Algorithmus (engl.: Alternating Direction Method of Multipliers), der bereits gute Ergebnisse in praktischen Versuchen erzielt hat [2]. Allerdings erfordert dieser Algorithmus die Annahme von starker Dualität, besitzt nur eingeschränkte theoretische Konvergenzgarantien für nicht-konvexe Probleme und weist eine hohe Dimensionalität der lokalen Probleme auf. Verbunden mit der Notwendigkeit mehrerer Kommunikationsschritte pro Iteration und der Unzulässigkeit von nicht ausiterierten Zwischenlösungen, erschwert dies die praktische und theoretische Anwendung. Im Gegensatz dazu iterieren primale Methoden direkt auf den gekoppelten Variablen. Vorteile sind dabei eine geringere Subproblemkomplexität, keine Annahme der starken Dualität und die Zulässigkeit der Zwischenlösungen unter bestimmten Bedingungen.

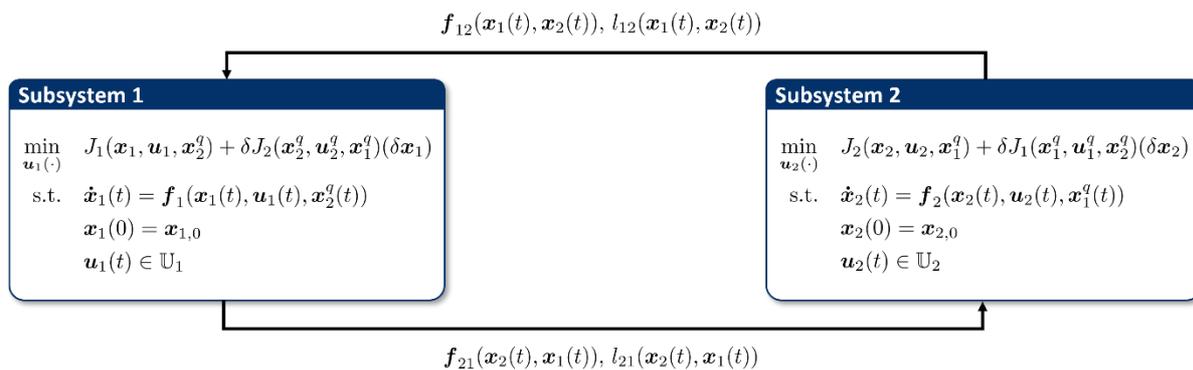


Abb. 1: Skizzenhafte Darstellung des sensitivitätsbasierten Ansatzes. Die Subsysteme lösen parallel modifizierte lokale Probleme, welche durch Sensitivitäten koordiniert werden. Diese werden durch Gâteaux-Ableitungen definiert, während die Entkopplung auf primaler Dekomposition basiert.

In diesem Vortrag wird daher ein primaler, sensitivitätsbasierter Ansatz zur Lösung hochskalierter nichtlinearer Optimalsteuerungsprobleme vorgestellt [4,5,6], welcher skizzenhaft in Abbildung 1 gezeigt ist. Die Methode wurde bereits umfassend für lineare Systeme untersucht [5]. Für nichtlineare Systeme existieren allerdings bislang kaum Ergebnisse. In dieser Hinsicht werden die lokalen Kostenfunktionen mittels linearer Approximation der Kostenfunktionale benachbarter Agenten erweitert, um ein kooperatives Verhalten zu erreichen. Der Vorteil besteht darin, dass die Sensitivitäten effizient und lokal auf Agentenebene berechnet werden können und dass bei der verteilten Lösung nur ein Kommunikationsschritt pro Iteration notwendig ist, was eine Seltenheit in der verteilten Optimierung darstellt [4]. Weiterhin werden die Konvergenzeigenschaften des vorgestellten Algorithmus betrachtet, welche genutzt werden können, um Stabilität des geschlossenen Kreises für eine hinreichend große Anzahl an Iteration pro Abtastzeitschritt zu gewährleisten. Zur weiteren Reduzierung der Wartezeiten wird eine asynchrone Ausführung mit veralteten Daten betrachtet [6]. Abschließend wird die Echtzeitfähigkeit des Verfahrens durch experimentelle Ergebnisse an einem magnetischen Planarantriebssystem, welches in Abbildung 2 dargestellt ist, aufgezeigt.



Abb. 2: Das Planarantriebssystem XPlanar.

## Literatur

- [1] K. Worthmann, C. M. Kellet, P. Braun, L. Grüne, S. Weller. Distributed and decentralized control of residential energy systems incorporating battery storage. *Trans. on Smart Grid*, 2015.
- [2] G. Stomberg, H. Ebel, T. Faulwasser, P. Eberhard. Cooperative distributed MPC via decentralized real-time optimization: Implementation results for robot formations. *Control Eng. Practice*, 2023.
- [3] M. A. Müller, F. Allgöwer. Economic and distributed model predictive control: Recent developments in optimization-based control. *SICE J. of Control Measurement and System Integration*, 2017.
- [4] M. Pierer v. Esch, A. Völz, K. Graichen. A fixed-point iteration scheme for sensitivity-based distributed optimal control. *Trans. on Automatic Control*, 2024.
- [5] H. Scheu, W. Marquardt. Sensitivity-based coordination in distributed model predictive control". *J. of Process Control*, 2011.
- [6] M. Pierer v. Esch, A. Völz, K. Graichen. Sensitivity-based distributed model predictive control: synchronous and asynchronous execution compared to ADMM. *at-Automatisierungstechnik*, 2024.

# Towards explainable data-driven predictive control with regularizations

Manuel Klädtke und Moritz Schulze Darup

Lehrstuhl für Regelungstechnik und cyberphysische Systeme (RCS)

TU Dortmund

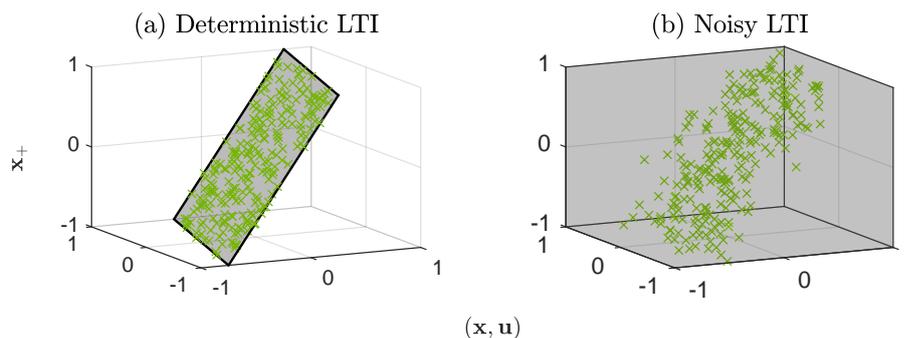
Leonhard-Euler-Straße 2, 44227 Dortmund

Telefon: +49 231 755-5620 / +49 231 755-5611

E-Mail: manuel.klaedtke@tu-dortmund.de / moritz.schulzedarup@tu-dortmund.de

**Keywords:** Data-driven control, predictive control, parametric optimization, explainability

**Abstract:** Direct data-driven predictive control (DPC) is a fairly recent [1] and popular alternative to classical model predictive control (MPC) [2]. In DPC, the use of an explicit prediction model is replaced by direct synthesis of predicted trajectories via linear combinations of historical data trajectories. When using persistently exciting and exact data of LTI systems (or nonlinear systems with known static nonlinearities [3]), these linear combinations offer an exact system representation [4], and lead to equivalence between DPC and MPC. However, when considering more realistic scenarios with measurement noise or more general nonlinearities, the structure enabling this procedure is lost (see Fig. 1) and naive implementations of DPC may fail spectacularly. As a remedy, one may apply (structured) low-rank approximations [5] to the data matrix or employ regularizations [6]. Since low-rank approximations restore a unique system representation, the resulting predictive behavior may be considered well understood. The same, however, is not true for DPC schemes combining raw data with regularizations, as the heuristic interpretations associated with the regularizations are often too general and may be misleading in the specific context of DPC. To address this gap, we focus on developing tools to enhance the explainability of regularized DPC schemes, shedding light on their implicit interactions and improving their interpretability.



**Abbildung 1:** The plots depict trajectory data samples (green) and the space spanned by linear combinations of them (gray). Just a little noise destroys the natural structure in (a) (here, 2-dimensional subspace) and allows for arbitrary predictions via linear combinations in (b).

This talk starts out with a short introduction to direct data-driven prediction via linear combinations, focusing on intuitive geometric interpretations. We then dive deeper into the interaction between DPC and (quadratic) regularization techniques, analyzing their trajectory-specific effects and uncovering the implicit prediction models they induce [7,8]. In the spirit of explainability, we present intuitive interpretations of these findings, ensuring accessibility for audiences

new to DPC. Furthermore, we highlight commonly overlooked pitfalls and common misconceptions in DPC, offering insights valuable for both newcomers and experts in the field. Finally, as an outlook, we briefly indicate how our analysis tools can also be applied to synthesize new DPC schemes with beneficial features.

## References

- [1] J. Coulson, J. Lygeros, and F. Dörfler. Data-enabled predictive control: In the shallows of the DeePC. *18th European Control Conference*, pp. 307–312, 2019.
- [2] J. B. Rawlings, D. Q. Mayne, and M. M. Diehl. *Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design*. Nob Hill Publishing, 2nd edition, 2017.
- [3] J. Berberich and F. Allgöwer. A trajectory-based framework for data-driven system analysis and control. *2020 European Control Conference*, pp. 1365–1370, 2020.
- [4] J. C. Willems, P. Rapisarda, I. Markovskiy, and B. L.M. De Moor. A note on persistency of excitation. *Systems & Control Letters*, 54(4):325–329, 2005. ISSN 0167-6911.
- [5] Structured low-rank approximation and its applications. *Automatica*, 44(4):891–909, 2008. ISSN 0005-1098. 10.1016/j.automatica.2007.09.011.
- [6] F. Dörfler, J. Coulson, and I. Markovskiy. Bridging direct and indirect data-driven control formulations via regularizations and relaxations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 68(2):883–897, 2023. 10.1109/TAC.2022.3148374.
- [7] M. Klädtke and M. Schulze Darup. Implicit predictors in regularized data-driven predictive control. *IEEE Control Syst. Lett.*, 7:2479–2484, 2023. 10.1109/LCSYS.2023.3285104.
- [8] M. Klädtke and M. Schulze Darup. Towards a unifying framework for data-driven predictive control with quadratic regularization. arXiv:2404.02721, 2024.

# Bifurkationskontrolle und Frequenzverstellbarkeit kritisch gekoppelter MEMS für neuromorphe Akustiksensoren

Hermann Folke Johann Rolf

Digital Process Engineering  
Karlsruher Institut für Technologie  
folke.rolf@kit.edu

Thomas Meurer

Digital Process Engineering  
Karlsruher Institut für Technologie  
thomas.meurer@kit.edu

**Schlüsselwörter:** Bifurkationskontrolle, Frequenzverstellbarkeit, Andronov-Hopf Bifurkation, Gekoppelte Systeme, MEMS, Neuromorpher Akustiksensoren

Derzeitige Techniken für die Sprachverarbeitung benötigen viel Zeit und Energie, um in sich verändernden Umgebungen zuverlässige Ergebnisse zu erzeugen [1]. In Vergleich zu derzeitigen Hörgeräten, kann der Hörsinn unter widrigsten Bedingungen zuverlässig Signale verarbeiten. Dies liegt an den Eigenschaften der Hörschnecke (Cochlea), welche zum einen das Signal adaptiv und aktiv verarbeitet [2], wodurch eine Anpassung an die äußere Umgebung möglich wird. Zum anderen ist die Verstärkung kompressiv, d.h., schwache Signale werden verstärkt, während starke Signale gedämpft werden, und frequenzselektiv, wodurch das zu verarbeitende Signal direkt in Frequenzkomponenten zerlegt wird [2,3]. Diese Eigenschaften können beispielsweise durch Oszillatoren, in denen kontrolliert eine Andronov-Hopf (AH) Bifurkation erzeugt wird, nachgebildet werden [3].

In dieser Arbeit wird die Dynamik der Hörschnecke durch einen thermisch aktuierten, mikroelektisch-mechanischen Sensor (MEMS-Sensor) nachgeahmt. Dieser MEMS-Sensor ist im Prinzip als Biegebalken konzipiert und besteht aus Silizium- und Siliziumoxid-Schichten. Auf der oberen Schicht werden Aluminiumleitungen eingebettet, so dass die Temperatur des Aktors gesteuert werden kann [4]. Es kann gezeigt werden, dass durch eine geschickte Wahl der Rückkopplung der Balkenauslenkung im geschlossenen Regelkreis zwei unterschiedliche AH-Bifurkation erzeugt werden [4,5].

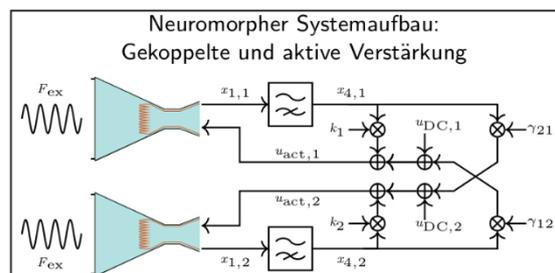


Abbildung 1: Schematischer Systemaufbau mit zwei MEMS-Sensoren.

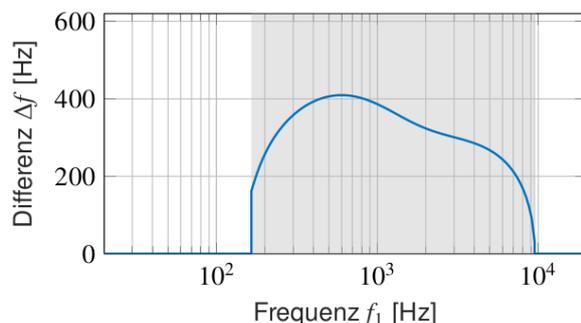


Abbildung 2: Maximale Frequenzdifferenz  $\Delta f$  in Abhängigkeit der Frequenz  $f_1$  von Sensor 1.

Um einen großen Frequenzbereich abzudecken werden jedoch viele dieser Sensoren benötigt, da die charakteristische Frequenz eines einzelnen Sensors konstant und frequenzselektiv ist. Diesen Nachteil kann man z. B. durch die Realisierung einer verstell- bzw. steuerbaren charakteristischen Frequenz beheben, wodurch es konzeptionell möglich wird, einen größeren Frequenzbereich abzudecken [5]. Dieser Beitrag stellt sowohl analytische als

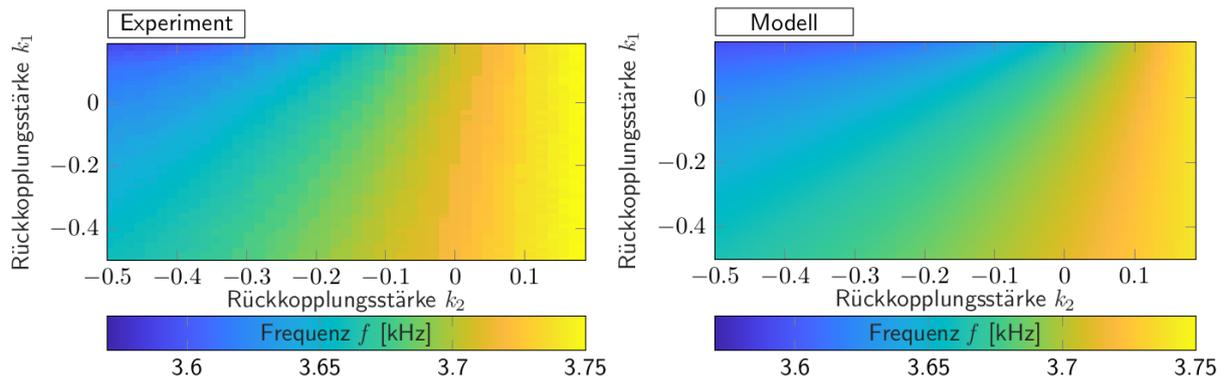


Abbildung 3: Vergleich zwischen Simulation und Experiment der verstellbaren Frequenz in Abhängigkeit der Rückkopplungsstärken  $k_{11}$  und  $k_{22}$  zweier gekoppelter MEMS-Sensoren.

auch experimentelle Ergebnisse vor, die zeigen, dass die charakteristische Frequenz durch die gezielte injektive Kopplung von (mindestens) zwei MEMS-Sensoren verstellt werden kann, indem die Asymmetrie zwischen beiden Sensoren durch eine aktive Verstärkung geregelt wird [5]. Der Aufbau des Systems ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Der analytische Nachweis der Frequenzverstellbarkeit erfolgt unter Einbezug des Hopf-Theorems (siehe [6]), welches die Analyse der auftretenden AH-Bifurkationen und speziell der resultierenden charakteristischen Frequenzen im kritischen vereinfacht. Es stellt sich heraus, dass im Fall von zwei MEMS-Sensoren die Frequenzverstellbarkeit im subkritischen Bereich nur durch die Kopplung von Sensoren mit geringen Differenzen in den natürlichen Frequenzen möglich ist. Die numerische Analyse dieser Bedingung ist in Abbildung 2 gezeigt und ein Vergleich zwischen Simulation und Experiment der resultierenden Frequenzverstellbarkeit im kritischen Punkt für Sensoren mit den natürlichen Frequenzen 3630 Hz und 3790 Hz ist in Abbildung 3 dargestellt. Laufende Arbeiten beschäftigen sich mit der Kombination der Eigenschaft der kontrollierten Frequenzverstellung mit Verfahren zur Signalauswertung, um mit möglichst wenigen MEMS-Sensoren das Spektrum eines Signals abzutasten und zu verarbeiten.

## Literatur

- [1] F. Abreu Araujo et. al. „Role of non-linear data processing on speech recognition task in the framework of reservoir computing“. *Sci Rep* 10, 328 (2020).
- [2] T. Gold und R. J. Pumphrey. „Hearing. I. The cochlea as a frequency analyzer“. *Proc. R. Soc. B.* 135, 462-491 (1948).
- [3] A. J. Hudspeth, F. Jülicher und P. Martin. „A Critique of the Critical Cochlea: Hopf – a Bifurcation – is Better Than None“. *Journal of Neurophysiology*, 104:3, 1219-1229 (2010).
- [4] C. Lenk et al. „Neuromorphic acoustic sensing using an adaptive microelectromechanical cochlea with integrated feedback“. *Nat Electron* 6, 370-380 (2023).
- [5] H. F. J. Rolf und T. Meurer. On coupled oscillators modeling bio-inspired acoustic sensors: Bifurcation analysis towards tunability enhancement. *Chaos* 34:10, 103135 (2024).
- [6] J. E. Mardsen und M. McCracken „The Hopf Bifurcation and its Applications“. Springer New York, NY, Series: Applied Mathematical Sciences (2012).

# Digital representations for orchestrating wireless communication systems via the asset administration shell

Gustavo Cainelli

Institut für Automation und Kommunikation  
ifak Magdeburg  
gustavo.cainelli@ifak.eu

Lisa Underberg

Lehrstuhl für Digitale Automatisierungssysteme  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
lisa.underberg@ovgu.de

**Key words:** Asset administration shell, digital twin, wireless automation, wireless communication system

Industrial automation is evolving from mass production to the creation of highly customized products, requiring production systems that can dynamically adapt to unique requirements. This shift highlights the importance of wireless communication systems (WCSs) as a key enabler for flexible and efficient manufacturing processes. Digital twins provide a powerful framework for designing and managing WCSs by creating virtual representations of physical systems. This enables real-time simulation, optimization, and adaptation to dynamic conditions.

However, accurately modelling WCSs is essential to ensure that digital twins effectively address operational challenges. The presented research focuses on developing models to represent production system assets, with an emphasis on wireless communication. By transforming elements of the physical domain into digital counterparts, the approach enables continuous adaptation, allowing systems to modify application parameters in response to interference or adjust communication capabilities based on evolving requirements. This key approach is depicted in Figure 1. The production system is composed of the three subsystems technical plant system, automation system and communication system, which exist in both the physical and digital domain.

The models are validated in scenarios such as communication system design and real-time parameter adjustments of application and WCS, demonstrating their versatility. This includes heterogeneous networks, for example PROFINET over 5G [2]. The results demonstrate that integrating WCSs into digital twins using the Asset Administration Shell (AAS) increases process resilience and performance [3,4].

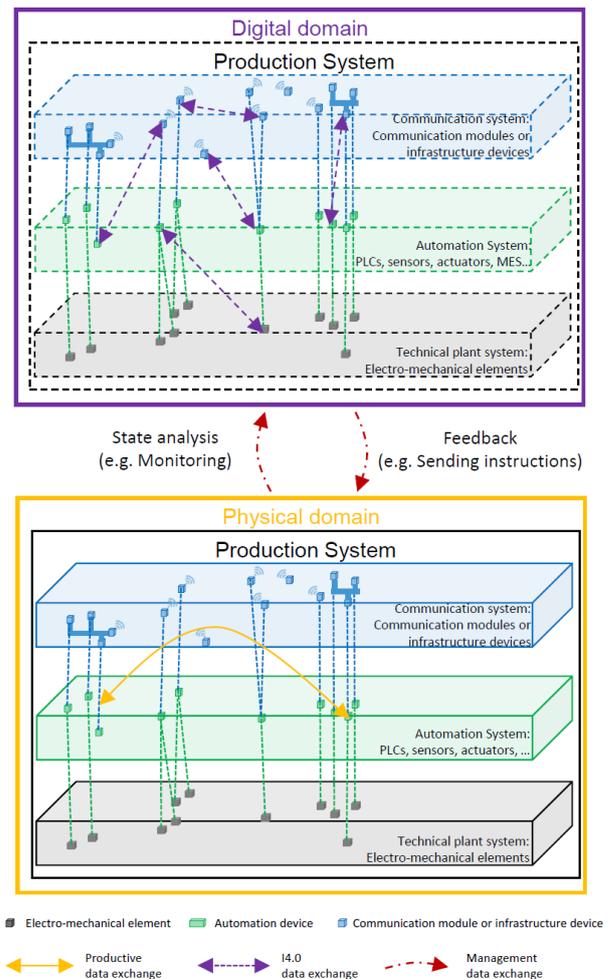


Figure 1: Interaction between physical and digital domains showing productive, 14.0, and management data exchange types (adapted from [1]).

## Literature

- [1] G. P. Cainelli et al. "Framework for bringing wireless communication into the context of Industrie 4.0". In: *Kongress AUTOMATION*. 2022
- [2] G. P. Cainelli et al. „Performance testing of a 5G network for PROFINET and PROFI-safe data transmission from the application perspective". In: *IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2023.
- [3] G. P. Cainelli et al. "Dynamic reconfiguration of application and communication in industry 4.0 with digital twin for enhancing exibility". In: *at - Automatisierungstechnik*. 2024.
- [4] G. P. Cainelli et al. „Managing the 5G system based on production requirements using an asset administration shell approach". In: *22nd IFAC World Congress*. 2023.

# Pfadplanung zur visuellen Inspektion auf Basis von Voxel-Modellen

Raphael Hagmanns<sup>1,2</sup>

Jürgen Beyerer<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme (IES)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik  
und Bildauswertung IOSB

raphael.hagmanns@kit.edu

juergen.beyerer@iosb.fraunhofer.de

**Schlüsselwörter:** Inspektionsplanung, Viewpointplanung, Drohnen, Robotisches Inspektionsystem

Die roboterbasierte autonome Inspektion bekannter Objekte ist für viele Sicherheitsanwendungen wie Infrastrukturinspektion und Überwachung unerlässlich. Die Inspektionsplanung hat mehrere Optimalitätskriterien, wobei eine maximale Abdeckung und ein effizienter Inspektionsplan im Vordergrund stehen. Weitere Einschränkungen ergeben sich typischerweise aus der Kinematik der Inspektionsplattform oder der Umgebung.

Modellbasierte Inspektionsplanungssysteme verwenden häufig heruntergesamplte Dreiecksnetze als Eingabemodelle. Die schlechte Verfügbarkeit solcher Modelle für viele Geometrien schränkt die Anwendbarkeit in vielen praktischen Anwendungen ein. In diesem Vortrag wird gezeigt, wie Voxel-Modelle als flexible Eingabemodelle für Inspektionsplanungsaufgaben verwendet werden können. Praktische Herausforderungen wie die Berücksichtigung eines Umgebungsmodells oder weiterer Randbedingungen können so in die Inspektionsplanung integriert werden.

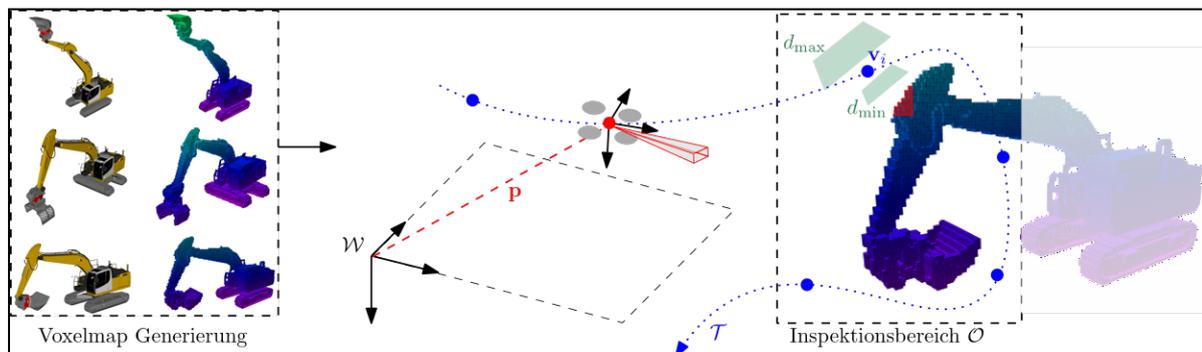


Abbildung 1: Hier erfolgt die Inspektion eines Baggers, bei dem ein Voxelmodell aus seiner aktuellen Konfiguration gesampelt wird. Die Trajektorienplanung findet zunächst Viewpoints (blau), die den Inspektionsbereich vollständig abdecken, bevor ein zusammenhängender Plan gesucht wird.

Nach einem Supervoxelsampling des Modells generiert der vorgestellte Ansatz zunächst eine Menge an Viewpoints durch Projektion aller Hindernisse auf eine Inspektionsgeometrie. Anschließend wird eine Teilmenge ausgewählt, die sowohl eine möglichst vollständige Abdeckung des Objekts erreicht als auch die Länge des Plans minimiert. Dazu wird das Zuordnungsproblem in ein Generalized Traveling Salesman Problem transformiert, welches die beiden Kriterien Abdeckung und Länge optimiert.

Im Vortrag wird gezeigt, dass ein solcher Ansatz in vielen Fällen klassischen zweistufigen Verfahren überlegen ist, da flexiblere Eingangsdaten verwendet werden können und dennoch effizientere Pläne bei ähnlicher Abdeckung erreicht werden. Darüber hinaus erlaubt das vorgestellte Verfahren die Definition der Zielabdeckung durch Vorgabe einer Ground Sampling Distance.

Das Verfahren wird an einer Vielzahl von synthetischen und realen Modellen demonstriert. Darüber hinaus werden praktische Herausforderungen diskutiert und Anwendungsmöglichkeiten wie die 3D-Rekonstruktion vorgestellt. Abschließend werden einige Szenarien aus der realen Welt vorgestellt, in denen das System in der Praxis eingesetzt wurde.

## Literatur

- [1] A. Bircher, K. Alexis, M. Burri, P. Oettershagen, S. Omari, T. Mantel, and R. Siegwart, "Structural Inspection Path Planning via Iterative Viewpoint Resampling with Application to Aerial Robotics". In: *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, 2015.
- [2] S. Jung, S. Song, P. Youn, and H. Myung, "Multi-Layer Coverage Path Planner for Autonomous Structural Inspection of High-Rise Structures." In: *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Syst (IROS)*, 2018.
- [3] R. Hagmanns, B. Ruf, R. Bockmuehl, M. Weisser, J. Beyerer, "Path Planning for the Autonomous Inspection of Voxelized Structures", In: *Proc. IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*, 2024

# Zustandsschätzung hybrider Systeme

Fabian Schwenke

Fachgebiet für Regelungstechnik  
Institut für Prozess- und Verfahrenstechnik  
Technische Universität Berlin  
schwenke@tu-berlin.de

Steffi Knorn

Fachgebiet für Regelungstechnik  
Institut für Prozess- und Verfahrenstechnik  
Technische Universität Berlin  
knorn@tu-berlin.de

**Schlüsselwörter:** Zustandsschätzung, Hybride Systeme, Hybride Beobachter

Zahlreiche in der realen Welt existierende Phänomene, wie cyber-physische Systeme [7], mechanische Systeme mit Einschlägen [4] und sogar biologische Systeme [2] können ein Verhalten aufweisen, welches sich gut durch hybride Modelle nachbilden lässt. Die hybriden Systeme zeigen eine Kombination aus kontinuierlicher und diskreter Dynamik, wobei die diskreten Zustandsänderungen auch von dem Startwert abhängig sind. Möchte man ein solches System beobachten, so ist dieser Startwert unbekannt, weshalb sich die Zustandsschätzung als nicht trivial erweist [3].

Für den Fall, dass diskrete Zustandsänderungen unmittelbar gemessen werden können, existiert bereits eine größere Anzahl an Arbeiten zur Beobachterausslegung. Diese beruhen bspw. auf der Modellierung des Systemverhaltens als „impulsive“ oder „switched impulsive system“ [6,8] bzw. als allgemeineres modelliertes hybrides System [2]. Die Beobachtung bei nicht direkt messbaren Sprüngen ist Bestandteil vor allem neuerer Veröffentlichungen, wie bspw. [1] und [3] zeigen.

In [3] wurde eine sehr allgemeine Modellierung dieses speziellen Systemverhaltens mittels hybrider Inklusionen verwendet, deren Grundlagen in [5] ausführlich beschrieben sind. Die Autoren stellen die Struktur eines Beobachters für Systeme mit nicht direkt messbaren diskreten Zustandsänderungen vor. Die Schätzung erfolgt über einen „High Gain Observer“, welche bei präzidiertem Annäherung an einen Systemsprung von einer Open-loop Zustandsschätzung abgelöst wird. Hierdurch kann lokale Beobachtbarkeit, bzw. mit einer Erweiterung sogar ein semi-globaler hybrider Beobachter erhalten und überdies ansonsten auftretendes „Overpeaking“ unterbunden werden.

Zwar liefern die Autoren einen Beweis der Stabilität, allerdings bleibt die Frage nach der numerischen Auslegung der Korrekturmatrix unbeantwortet. Im Fall messbarer Systemsprünge und linearer kontinuierlicher sowie diskreter Systemdynamiken lässt sich die Korrekturmatrix nach Überführung des Problems in ein Messfehlermodell über das Lösen von linearen Matrixungleichungen durchführen [2]. Dies ist bei nicht bekannter Sprungzeit ohne weiteres nicht möglich. Um dennoch auf vorhandene Ansätze zur Beobachterausslegung zurückgreifen zu können, wird in dem Vortrag eine Umformulierung eines sehr ähnlich zu dem in [3] gelagerten Problems vorgestellt. Ähnlich zu dem Fall bekannter Sprungzeiten, wird ein künstliches Fehlersystem eingeführt und die kritische Sprungstelle, bei der der präzidierte Zustandsverlauf sowie das reale System mitunter Abweichungen in der Zahl möglicher durchgeführter Sprünge aufweisen, über einen Fehlerterm berücksichtigt. Dies ermöglicht die Überführung in ein lineares parametervariierendes Schätzfehlersystem, für das zumindest „Input-to-State-Stability (ISS)“ gefordert und, wie gezeigt wird, in der dargestellten Form auf bekannte Auslegungstechniken mittel linearer Matrixungleichungen zurückgegriffen werden kann.

## Literatur

- [1] P. Bernard and R. G. Sanfelice. A local hybrid observer for a class of hybrid dynamical systems with linear maps and unknown jump times. In *2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. IEEE, dec 2021.
- [2] P. Bernard and R. G. Sanfelice. Observer design for hybrid dynamical systems with approximately known jump times. *Automatica*, 141:110225, 2022.
- [3] P. Bernard and R. G. Sanfelice. Semiglobal high-gain hybrid observer for a class of hybrid dynamical systems with unknown jump times. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 69(9):5804–5819, September 2024.
- [4] R. Goebel, J. Hespanha, A. R. Teel, C. Cai, and R. G. Sanfelice. Hybrid systems: Generalized solutions and robust stability. *IFAC Proceedings Volumes*, 37(13):1–12, sep 2004.
- [5] R. Goebel, R. G. Sanfelice, and A. R. Teel. *Hybrid dynamical systems modeling, stability, and robustness*. Princeton University Press, 2012.
- [6] E. A. Medina and D. A. Lawrence. State estimation for linear impulsive systems. In *2009 American Control Conference*, pages 1183–1188. IEEE, 2009.
- [7] R. G. Sanfelice. *Analysis and Design of Cyber-Physical Systems: A Hybrid Control Systems Approach*, pages 3–31. CRC Press, 2015.
- [8] A. Tanwani, H. Shim, and D. Liberzon. Comments on “observability of switched linear systems: Characterization and observer design”. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 60(12):3396–3400, December 2015.

# Towards Automated Sample Size Selection for Unsupervised Concept Drift Detectors

Daniel Lukats  
Frederic Stahl

Marine Perception  
Deutsches Forschungszentrum  
für Künstliche Intelligenz  
daniel.lukats@dfki.de  
frederic\_theodor.stahl@dfki.de

Axel Hahn

Systems Engineering for Future Mobility  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

axel.hahn@dlr.de

**Schlüsselwörter:** concept drift, sample sizes, model adaptation, data drift, evaluation

In machine learning, the properties of long-running data streams may change significantly over time, a phenomenon called *concept drift*. If concept drift is not detected, the predictive performance of classifiers or regression models deployed on the data stream may decline. Concept drift detectors enable the re-evaluation of predictive models and their adaptation to the new conditions if necessary. Concept drift is discerned by the nature of the transition from one concept to another: an instantaneous change is denoted *abrupt*, whereas a transition over multiple time steps is denoted *incremental* or *gradual* (see Abbildung 1).

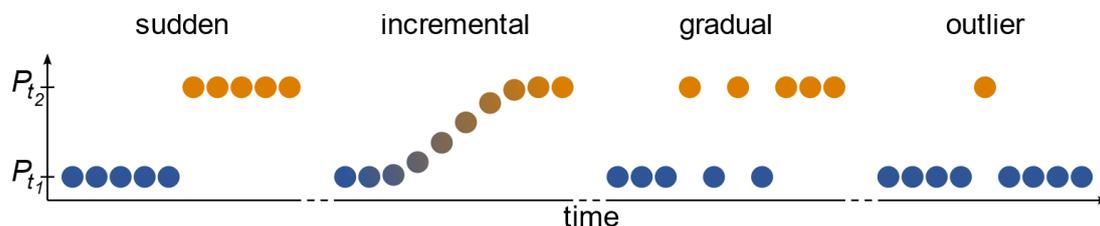


Abbildung 1: The different types of concept drift compared with an outlier.

Detectors operate in real-time, comparing recent data samples with historic data. While supervised concept drift detectors observe the error signal of a model deployed on the data stream, unsupervised concept drift detectors observe the feature space, e.g., sensor readings. As it is unrealistic to rely on the availability of a classification error signal in real-time due to high costs, we focus on unsupervised concept drift detection.

We first conducted a literature survey and benchmarked seven unsupervised concept drift detectors on a selection of real-world data streams. Our benchmarks revealed several issues with the state-of-the-art, including biased or incomplete evaluation approaches. The metrics used in the literature either favor a specific number of adaptations rather than correct concept drift detection or they are unsuitable for incremental and gradual concept drift.

As a consequence, we developed a new evaluation approach called *response curves*, which is suitable for all types of concept drift. Response curves combine two distance-based measures, the *time to detection* and the *time to adaptation*, with predictive performance measures such as the *F-score*. Instead of evaluating an arbitrary threshold for the distance-based measures, their limit is considered to determine whether a prediction is correct or false

(see Abbildung 2). Hence, this approach considers both the timeliness of a concept drift detector and its predictive performance.

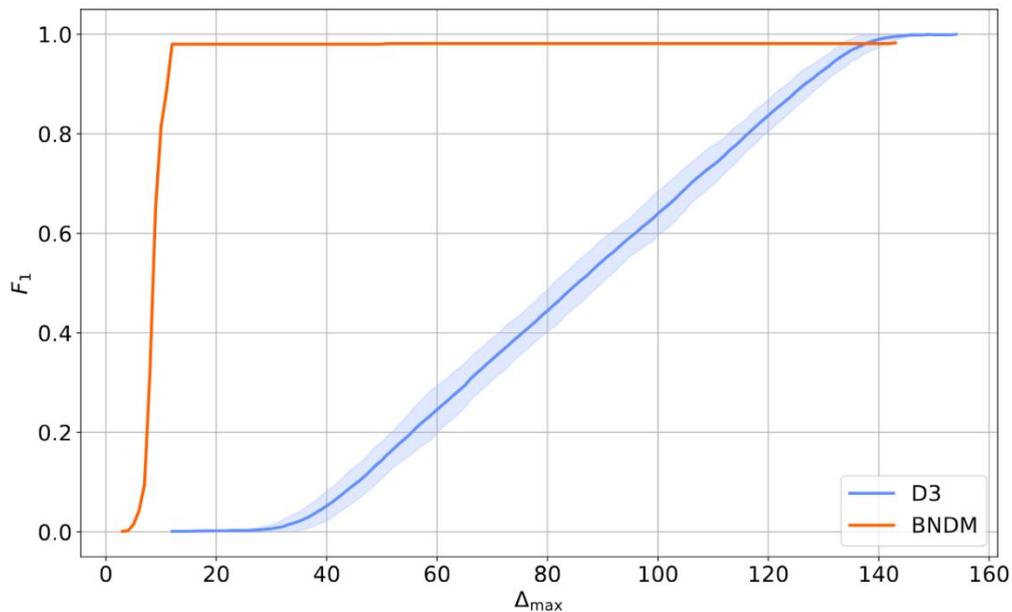


Abbildung 2: Response curves for two concept drift detectors provide information about both time and correctness of concept drift detection.

Furthermore, our analysis showed that the sample sizes of the observed data are chosen arbitrarily. Readers are advised to choose a sample size suitable to represent the current concept, but authors merely provide general guidance instead of actionable explanations. Hence, we analyze which properties of a concept need to be considered when choosing sample sizes, e.g., seasonality, trends or outlier rates. Finally, this analysis is used to discuss approaches for automated sample size selection for (unsupervised) concept drift detectors, e.g., with active learning or sample size determination for statistical tests.

## Literatur

- [1] D. Lukats et al. „A benchmark and survey of fully unsupervised concept drift detectors on real-world data streams“. In: *International Journal of Data Science and Analytics*. 2024.
- [2] D. Lukats und F. Stahl. „On Reproducible Implementations in Unsupervised Concept Drift Detection Algorithms Research“. In: *Artificial Intelligence XL. Lecture Notes in Computer Science*. 2023.

# Beseitigung des transienten Fehlers von Zustandsbeobachtern

Florian Meiners

FG Regelungsmethoden u. Intelligente Systeme  
TU Darmstadt  
florian.meiners@tu-darmstadt.de

Jürgen Adamy

FG Regelungsmethoden u. Intelligente Systeme  
TU Darmstadt  
juergen.adamy@tu-darmstadt.de

**Schlüsselwörter:** Nichtlineare Beobachter, stochastische Systeme, num. Differenzieren

Aufgrund von unbekanntem Anfangszustand und nicht modellierten Störungen leiden klassische Beobachterentwürfe unter ausgeprägten Spitzen im Verlauf des Schätzfehlers. Während des Einschwingens, oder aufgrund von rasch aufeinander folgenden Störungen, ist die Schätzung des Beobachters unbrauchbar. Es wird eine allgemein anwendbare Methodik präsentiert, die der Bekämpfung dieses transienten Beobachterfehlers an der Wurzel dient. Sie beruht auf einer direkten Rekonstruktion des Systemzustands aus den sukzessiven Ableitungen des Ausgangs, welche bei beobachtbaren Systemen stets möglich ist. Die erhaltene Näherung kann trotz Messrauschens und damit verbundenen Unsicherheiten in den Ausgangsableitungen dazu verwendet werden, einen Näherungswert für den tatsächlichen Zustand zu erhalten.

Anstatt lediglich eine solche direkte Rekonstruktion der Zustände zu verwenden, kombiniert der vorgestellte Beobachter sie mittels konvexer Linearkombination mit der Schätzung eines klassischen Beobachters. Ist der Ausgangsfehler groß, beruht das Verhalten des modifizierten Beobachters stark auf dem Verlauf der direkten Rekonstruktion.

Sobald eine Näherungslösung eingestellt ist, konvergiert der Schätzer rasch gegen das Verhalten des klassischen Beobachters. Abb. 1 zeigt die Schätzung des vorgestellten Beobachters (blau) im Vergleich zum Luenberger-Beobachter (orange) für ein Beispielsystem.

Im Vortrag wird das Konzept exemplarisch anhand des Luenberger-Beobachters und des High-Gain-Beobachters für nichtlineare Systeme in Normalform vorgestellt. Freiheitsgrade im Entwurf werden hervorgehoben. Stabilitätsnachweise für die Fehlerdynamik der vorgestellten Beobachter werden vorgestellt und die Wirksamkeit anhand von Simulationen illustriert. Für den linearen Fall wird ebenfalls die Erfüllung des Separationsprinzips gezeigt.

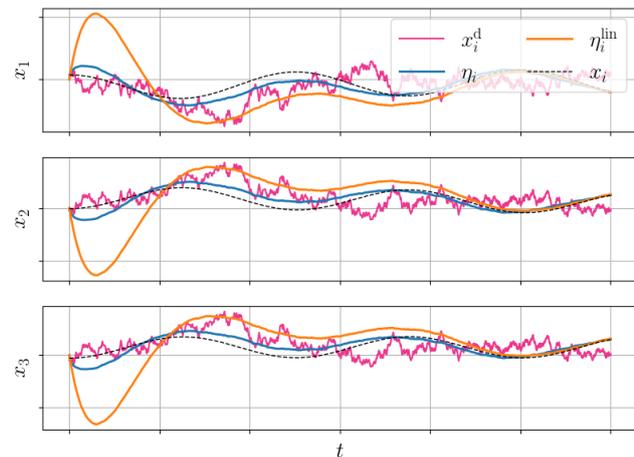


Abbildung 1: Beobachter für Beispielsystem

## Literatur

- [1] F. Meiners, J. Adamy “Observer Error Reduction via Direct State Reconstruction” IEEE Transactions on Automatic Control, erscheint im Februar 2025, online bereits einsehbar
- [2] F. Meiners, J. Adamy “Improving Discrete Observers via Unreliable Direct State Reconstruction” Systems & Control Letters, erscheint 2025

# Decentralized Truck Platooning Coordination

Yikai Zeng

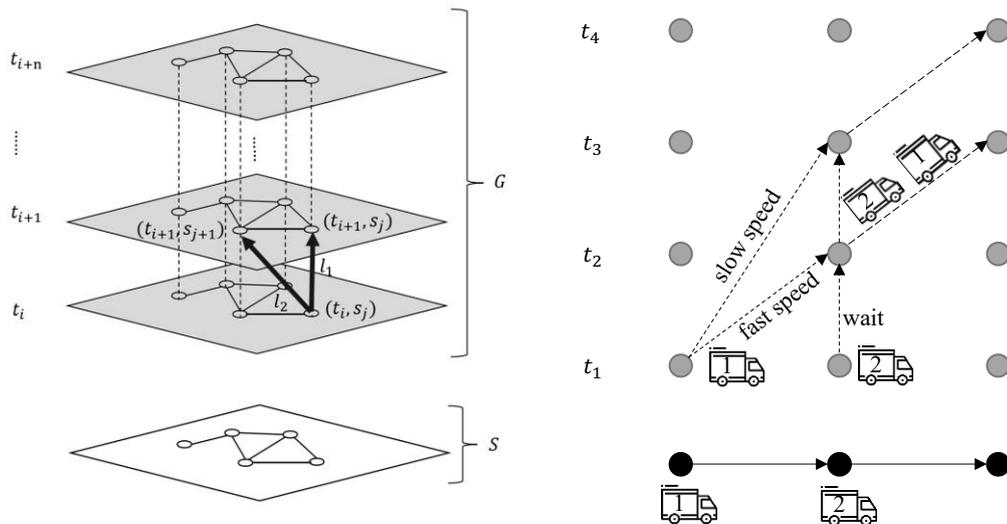
Chair of Traffic Process Automation  
Technische Universität Dresden  
yikai.zeng@tu-dresden.de

Meng Wang

Chair of Traffic Process Automation  
Technische Universität Dresden  
meng.wang@tu-dresden.de

**Keywords:** Truck Platooning, Platoon Matching, Distributed Optimization

Coordination for truck platooning refers to the active formation of a group of autonomous trucks traveling at a close spacing to reduce fuel costs. However, prevalent algorithms for the coordination problem are typically centralized and integer-constrained, which are not scalable to increasing fleet sizes and networks. By leveraging the computational power in autonomous trucks, we propose an algorithm to decompose the original centralized problem into a decentralized one and examine the performance of our decentralized algorithm against the centralized solution. Our analysis indicates that the computation time of the proposed decentralized algorithm is invariant to the increasing fleet size, at the cost of a small optimality gap. We remark that the proposed method does not warrant privacy protection and sketch a potential solution idea to the privacy-preserving truck platooning problem.



Road network extended to spatial-temporal network

A decentralized coordination process converted to a decentralized optimization of multiple trucks selecting edges on a spatial-temporal graph

## Literature

- [1] Zeng, Y., Wang, M. and Rajan, R. T., "Decentralized coordination for truck platooning." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 37.15 (2022): 1997-2015.
- [2] Zeng, Y. and Bai, T. and Mårtensson, J. and Wang, M., "Real-Time Privacy-Preserving Coordination for Cross-Carrier Truck Platooning." Available at SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5123307>.
- [3] Bai, Ting, et al. "Large-scale multi-fleet platoon coordination: A dynamic programming approach." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (2023).

# Distributed Safety-Critical Control for Nonlinear Heterogeneous Vehicle Platoons Subject to Time-Varying Communication Delays via Contraction and Regulation Theory

Ramzi Gaagai

Professur für Regelungstechnik  
Helmut-Schmidt-Universität - Universität der  
Bundeswehr Hamburg

gaagair@hsu-hh.de

Joachim Horn

Professur für Regelungstechnik  
Helmut-Schmidt-Universität - Universität der  
Bundeswehr Hamburg

joachim.horn@hsu-hh.de

**Index Terms:** Nonlinear vehicle platoons, communication delays, Riemannian contraction metrics, output regulation, safety functionals.

In the field of autonomous transportation systems research, there has been a growing focus on the control of vehicle platoons. Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC), commonly known as platooning is deemed a promising solution to address challenges such as fuel consumption reduction, improvement in traffic safety, and a decrease in vehicle emissions through the minimization of air resistance. Furthermore, platooning has the potential of optimizing traffic flow and enhancing road capacity [1]. These benefits are achieved using vehicle-to-vehicle (V2V) communication and onboard sensors that enable precise inter-vehicle coordination while maintaining string stability.



Figure 1: Tele-Operated Convoy Systems for Humanitarian Missions in Conflict.

This talk introduces a distributed safety-critical control framework for nonlinear heterogeneous vehicle platoons, designed to address the challenges posed by time-varying communication delays, nonlinear dynamics, and physical system constraints. The framework integrates contraction theory, nonlinear output regulation, and control barrier functions/ functionals

(CBFs/ CBFals) within a two-layer architecture to achieve synchronization and ensure safety and riding comfort. Inspired by the control design presented [1], which addresses the output synchronization of nonlinear heterogeneous multi-agent systems using regulation theory, and building upon our previous work [3], [4], we aim to solve the heterogeneous nonlinear vehicle platooning problem in three steps:

**Distributed Observer Design:** In the first step, a distributed observer (DO) is designed for each to estimate the leader's position and velocity using only the observer state information received from the preceding subject to a time-varying communication delay. The state of the observer implemented on-board of each vehicle, can be regarded as a "local reference generator" for the output of vehicle [2].

**Nonlinear Output Regulation:** In the second step, results from nonlinear output regulation theory [2, 5], are leveraged in a distributed manner, such that the output of each vehicle tracks its observer state, leading to the synchronization of the outputs of all vehicles to the leader state.

**Safety-Critical Control:** In the last step, the input resulting from the second step can be regarded as a nominal controller, and is fed into the common CBFs-based online quadratic program to enforce different constraints [6], [7]. Evidently, the nominal controller if applied, would synchronize the states of all the vehicles in the platoon, i.e., the platoon would reduce to a single point. Therefore, a collision avoidance mechanism is implemented via CBFs/ CBFals to ensure safety. The framework allows the inclusion of other constraints such as velocity constraints to respect road regulations, acceleration constraints to avoid unreasonable accelerations/decelerations, jerk constraints to control the ride comfort, and actuator constraints to comply with the vehicle's engine physical limitations.

In conclusion, the effectiveness of the proposed controller is validated through simulation, demonstrating that string stable behavior could be achieved with a relatively small time headway, despite the presence of time-varying communication delays. Future research will focus on advancing the theoretical analysis of string stability in nonlinear platoons with time-varying communication delays. The approach also promises to further address unresolved challenges and expand the applicability of the proposed framework in real-world scenarios. Arguably, the most significant direction of investigation is addressing the impractical assumption of perfect knowledge of vehicle parameters in real-world scenarios. Typical approaches to address this issue include using feedback linearization techniques by designing a controller using a linear model and applying the actual input using estimations of the vehicle parameters, after augmenting the controller with a non-smooth term designed using the theory of integral sliding mode compensate for the parameter mismatch [8]. Simulations show that the resulting controller can guarantee the internal stability of the heterogeneous platoon described by nonlinear dynamics although no formal guarantees are provided [8]. Recently many researchers proposed CACC controllers based on third-order nonlinear vehicle models assuming parameters uncertainty as in [9], [10], [11]. Our objective is to expand this framework and develop a robust solution to possible static or dynamic uncertainties affecting the vehicles in real-world scenarios with formal stability guarantees.

## Literatur

- [1] K. Ma, H. Wang, and T. Ruan, "Analysis of road capacity and pollutant emissions: Impacts of connected and automated vehicle platoons on traffic flow," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 583, p. 126301, 2021
- [2] A. Isidori, L. Marconi, and G. Casadei, "Robust output synchronization of a network of heterogeneous nonlinear agents via nonlinear regulation theory," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 59, no. 10, pp. 2680–2691, 2014.
- [3] R. Gaagai and J. Horn, "Distributed nonlinear control for homogeneous vehicle platoons using Riemannian contraction metrics and control barrier functions," in *2024 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)*. IEEE, 2024, pp. 1–6
- [4] R. Gaagai and J. Horn, "Distributed safety-critical control for linear homogeneous vehicle platoons subject to actuator and communication delays," in *2024 63rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)* (accepted). IEEE, 2024
- [5] S. Zoboli, S. Janny, and M. Giaccagli, "Deep learning-based output tracking via regulation and contraction theory," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 2, pp. 8111–8116, 2023.
- [6] A. D. Ames, J. W. Grizzle, and P. Tabuada, "Control barrier function based quadratic programs with application to adaptive cruise control," in *53rd IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE, 2014, pp. 6271–6278.
- [7] A. K. Kiss, T. G. Molnar, A. D. Ames, and G. Orosz, "Control barrier functionals: Safety-critical control for time delay systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 33, no. 12, pp. 7282–7309, 2023.
- [8] Y. Zheng, Y. Bian, S. Li, and S. E. Li, "Cooperative control of heterogeneous connected vehicles with directed acyclic interactions," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 127–141, 2019
- [9] Y. Zhu, J. Wu, and H. Su, "V2V-based cooperative control of uncertain, disturbed and constrained nonlinear CAVs platoon," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1796–1806, 2020.
- [10] X. Yang, E. Lefeber, C. Wu, Y. He, and Z. Zheng, "Adaptive controller design for heterogeneous cooperative adaptive cruise control system with uncertain vehicle parameters," in *2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, 2023, pp. 3712–3716.
- [11] J. Lan, "Data-driven cooperative adaptive cruise control for unknown nonlinear vehicle platoons," *arXiv preprint arXiv:2307.11505*, 2023.

# Synchronisationsbasierte verteilte Trajektorienplanung

Julius Beerwerth

Department of Aerospace Engineering  
University of the Bundeswehr  
Munich  
julius.beerwerth@unibw.de

Jianye Xu

Department of Computer Science  
RWTH Aachen University  
xu@embedded.rwth-aachen.de

Bassam Alrifaae

Department of Aerospace Engineering  
University of the Bundeswehr Munich  
bassam.alrifaae@unibw.de

**Schlüsselwörter:** Vernetzte und automatisierte Fahrzeuge, Trajektorienplanung

Vernetzte und automatisierte Fahrzeuge (CAVs) revolutionieren die Mobilität durch Konnektivität und Automatisierung [1]. Deutschland führt die CAV-Technologie dank Kooperationen zwischen Wissenschaft, Industrie und Regierung an. Wichtige Initiativen sind *UNICARagil*<sup>1</sup> (2018), das Open-Source-Architekturen für zukünftige Mobilitätssysteme entwickelte, und *AUTOtech.agil*<sup>1</sup> (2022), das eine modulare Architektur für elektrische, vernetzte und automatisierte Fahrzeuge fördert. Das Forschungszentrum *SFB/TRR 339*<sup>1</sup> arbeitet an einem digitalen Zwilling des Straßensystems zur Verbesserung von Sicherheit, Effizienz und Nachhaltigkeit. Das Projekt *Cooperatively Interacting Automobiles (CoInCar)* unter dem Schwerpunktprogramm *SPP 1835* der DFG entwickelte kollisionsfreie Trajektorien und förderte intelligente, kooperative Straßensysteme für CAVs.

Zentralisierte Trajektorienplanung koordiniert alle Fahrzeuge über eine zentrale Einheit, was einen *Single Point of Failure* darstellt und hohe Rechenzeiten bei großen Systemen verursacht. Eine Alternative ist die verteilte Trajektorienplanung, bei der jedes Fahrzeug seine eigene Trajektorie basierend auf Schätzungen der anderen plant. Dies kann jedoch zu Inkonsistenzen und Kollisionen führen, wenn die Schätzungen ungenau sind. Priorisierte verteilte Trajektorienplanung weist eine Reihenfolge basierend auf Prioritäten zu [2], [3], ist jedoch in der Skalierbarkeit eingeschränkt [4]. Dieser Artikel stellt einen synchronisationsbasierten Ansatz vor, der Planungskonsistenz sicherstellt und somit kollisionsfreie Trajektorien in der verteilten Planung gewährleistet [5].

Im [5] führten wir die synchronisationsbasierte Model Predictive Control (Sync. MPC) ein, die iterativ konsistente Trajektorien für alle Fahrzeuge berechnet. Basierend auf Cooperative MPC [6] plant jedes Fahrzeug für sich und seine Nachbarn. Die Kopplungstopologie wird durch einen ungerichteten gewichteten Graphen definiert. Algorithmus 1 zeigt die Schritte der Sync. MPC: Zuerst plant jedes Fahrzeug seine Trajektorie und prognostiziert die der Nachbarn (Schritt 1). Dann synchronisieren die Fahrzeuge ihre Trajektorien durch gewichteten Durchschnitt (Schritt 2). Sind die Pläne machbar, endet der Algorithmus; andernfalls wird iteriert. Diese Synchronisation, inspiriert von Multi-Agenten-Konsens [7] und Syn-

---

## Algorithmus 1 Sync. MPC

---

```
while Trajektorien unzulässig sind do  
  1. Lokale Trajektorien mit Kooperativer MPC planen  
  2. Trajektorien global durch Berechnung des gewichteten  
  Durchschnitts synchronisieren  
  if synchronisierte Trajektorien unzulässig sind then  
    Referenz auf synchronisierte Trajektorien setzen  
  end if  
end while
```

---

<sup>1</sup> *UNICARagil*: [www.unicaragil.de](http://www.unicaragil.de), *AUTOtech.agil*: [www.autotechagil.de](http://www.autotechagil.de), *SFB/TRR 339*: [www.sfbtr339.de](http://www.sfbtr339.de)

chronisationstechniken [8], garantiert die Konvergenz. Abbildung 1 zeigt, wie Fahrzeug 1 eine Kollision mit Fahrzeug 3 vermeidet, indem Fahrzeug 2 eine angepasste Trajektorie plant. In konvexen Räumen konvergiert Sync. MPC in einer Iteration, in nicht-konvexen Fällen erreicht er eine machbare Trajektorie, sofern der Kopplungsgraph ein Spannbaum ist.

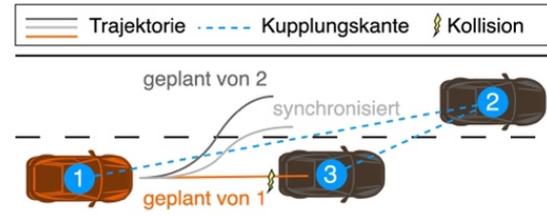


Abbildung 1: Synchronisierungsschritt aus der Perspektive von Fahrzeug 1 (orange).

Wir testeten Sync. MPC in Echtzeit mit unserem Cyber-Physical Mobility Lab [9] und dessen digitalem Zwilling in Szenarien wie Kreuzungen und Autobahnen. Videodemonstrationen sind auf YouTube<sup>2</sup> verfügbar. Im Vergleich zu zentralisierter MPC zeigte Sync. MPC ähnliche Trajektoriengenauigkeit und bessere Rechenzeiten, besonders bei mehr Fahrzeugen. Weitere Optimierungen der Rechenzeit sind jedoch notwendig für noch mehr Fahrzeuge. Zukünftige Arbeiten integrieren datengetriebene Techniken zur Optimierung der Kopplungstopologie und -gewichte sowie Synergien mit *Multi-Agent Reinforcement Learning* (MARL) [10]. Weiterentwicklungen synchronisationsbasierter Ansätze bieten großes Potenzial zur Verbesserung der Sicherheit und Effizienz von CAVs.

## Literatur

- [1] Cao et al., "Future directions of intelligent vehicles: Potentials, possibilities, and perspectives," IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2022.
- [2] Scheffe et al., "Increasing feasibility with dynamic priority assignment in distributed trajectory planning for road vehicles," in 2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2022.
- [3] Chen et al., "Integrated task assignment and path planning for capacitated multiagent pickup and delivery," IEEE Robotics and Automation Letters, 2021.
- [4] Scheffe et al., "Limiting computation levels in prioritized trajectory planning with safety guarantees," in 2024 European Control Conference (ECC). IEEE, 2024.
- [5] Kloock et al., "Coordinated cooperative distributed decision-making using synchronization of local plans," IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023.
- [6] Stewart et al., "Cooperative distributed model predictive control," Systems & Control Letters, 2010.
- [7] Ren et al., "Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies," IEEE Transactions on Automatic Control, 2005.
- [8] J. Lunze, "Networked control of multi-agent systems," Bookmundo Direct, 2019.
- [9] Kloock et al., "Cyber-Physical Mobility Lab: An open-source platform for networked and autonomous vehicles," in 2021 European Control Conference (ECC). IEEE, 2021.
- [10] Xu et al., "SigmaRL: A sample-efficient and generalizable multi-agent reinforcement learning framework for motion planning," in 2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), in press. IEEE, 2024.

<sup>2</sup> Videodemonstration 1: <https://youtu.be/fzuB0xsl4Jc>, Videodemonstration 2: <https://youtu.be/jS5iKgW0ZMY>

# Optimalschätzprobleme auf gleitendem Horizont: Robustheitsgarantien und Güteabschätzungen

Julian D. Schiller

Institut für Regelungstechnik  
Leibniz Universität Hannover  
schiller@irt.uni-hannover.de

Matthias A. Müller

Institut für Regelungstechnik  
Leibniz Universität Hannover  
mueller@irt.uni-hannover.de

**Schlüsselwörter:** Moving Horizon Estimation, Zustandsschätzung, Nichtlineare Systeme

Die Rekonstruktion der internen Zustände eines dynamischen Systems auf Basis gemessener Eingangs-/Ausgangsdaten ist ein Problem von großer praktischer Relevanz. Der Entwurf entsprechender Zustandsbeobachter, die sich insbesondere für komplexe nichtlineare Systeme eignen und Robustheit gegenüber Prozessstörungen und Messrauschen garantieren, ist ein aktuelles Forschungsgebiet und findet in vielfältigen Bereichen Anwendung, z.B. in der Verfahrenstechnik, in der Biomedizintechnik und Systemmedizin, Geophysik und Umweltwissenschaften, sowie in anderen Bereichen wie Robotik und Navigation.

Optimierungsbasierte Methoden zur Zustandsschätzung bieten eine praktische Alternative zu traditionellen Beobachtern. Sie zeichnen sich durch eine einfache und intuitive Implementierung aus, können von Natur aus nichtlineares Systemverhalten berücksichtigen und sind in der Lage, zusätzliche Informationen wie physikalisch begründete Beschränkungen bestimmter Zustände einzubeziehen.

In diesem Vortrag gehen wir auf aktuelle Forschung zur Optimalschätzung auf gleitendem Horizont (engl. *moving horizon estimation*, MHE) ein. Bei diesem Verfahren wird in jedem Zeitschritt ein Optimalschätzproblem fester Größe gelöst [1]. Wir zeigen, dass MHE unter einer relativ schwachen Entdeckbarkeitsbedingung an das System in der Lage ist, die unbekannt Systemzustände zuverlässig zu schätzen und gleichzeitig robust gegenüber Messrauschen und Modellungenauigkeiten zu sein. Hierbei fokussieren wir uns auf einen neuartigen Lyapunov-basierten Ansatz [2], der es im Gegensatz zu etablierten Methoden aus der Literatur erlaubt, theoretische Garantien unter praktisch realistischen Bedingungen herzuleiten, was wir an verschiedenen Beispielen illustrieren. Weiterhin gehen wir auf modifizierte Ansätze ein, um eine Echtzeitfähigkeit von MHE zu ermöglichen [3] und zeigen, unter welchen Anpassungen gleichzeitig konstante oder zeitveränderliche Parameter des Systems (trotz potentiell schwacher bzw. ausbleibender Anregung) geschätzt werden können [4-5].

Im zweiten Teil des Vortrags diskutieren wir neuartige Güteabschätzungen für MHE auf Basis von Turnpike-Eigenschaften des zugrundeliegenden Optimalschätzproblems [6]. Dies führt zu einer neuen Sichtweise auf MHE und letztlich zu einem modifizierten Ansatz, der einer zusätzlichen zeitlichen Verzögerung unterliegt. In verschiedenen praxisrelevanten Beispielen zeigen wir, dass bereits kleine Verzögerungen dazu führen können, die Approximationsgüte sowie die Genauigkeit von MHE in Bezug auf die unbekannt Systemzustände um bis zu 20-25 % zu verbessern.

## Literatur

- [1] James B. Rawlings, David Q. Mayne und Moritz M. Diehl. „Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design“. 2nd ed. Santa Barbara, CA, USA: Nob Hill Publishing, LLC, 2022.
- [2] Julian D. Schiller et al. „A Lyapunov Function for Robust Stability of Moving Horizon Estimation“. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 68(12), 2023.
- [3] Julian D. Schiller und Matthias A. Müller. „Suboptimal Nonlinear Moving Horizon Estimation“. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 68(4). 2023.
- [4] Julian D. Schiller und Matthias A. Müller. „Nonlinear Moving Horizon Estimation for Robust State and Parameter Estimation“. *Preprint*, arXiv:2312.13175. 2023.
- [5] Julian D. Schiller und Matthias A. Müller. „Moving Horizon Estimation for Nonlinear Systems with Time-Varying Parameters“. In: *IFAC-PapersOnLine* 58(18). 2024.
- [6] Julian D. Schiller, Lars Grüne und Matthias A. Müller. „Optimal state estimation: Turnpike Analysis and Performance Results“. *Preprint*, arXiv:2409.14873. 2024.

# Modulating Function based LTV state estimation with extensions to nonlinear systems

**Matti Noack<sup>†</sup>, Johann Reger<sup>†</sup>**

<sup>†</sup>Fachgebiet Regelungstechnik, TU Ilmenau, Helmholtzplatz 5, 98693 Ilmenau, E-Mail: {matti.noack, johann.reger}@tu-ilmenau.de

Die Verwendung von Modulationsfunktionen (MF) zur Schätzung unbekannter Systemgrößen geht auf Arbeiten von [1] und [2] über Parameteridentifikation zurück. Zu ihren Vorteilen zählen die direkte Anwendbarkeit der Modulationsfunktionsmethode (MFM) auf zeitkontinuierliche Prozesse sowie deren charakteristische Unterdrückung hochfrequenten Messrauschens. Im Zentrum des Ansatzes steht die Anwendung eines Kerns bzw. einer Testfunktion auf eine Differentialgleichung im integralen Sinn, was eine Überführung auf einen algebraischen Ausdruck zur Folge hat. Die Operation auf einem endlichen gleitenden Horizont hat das Potential, unbekannte Anfangsbedingungen zu eliminieren und somit die gesuchten Informationen zu isolieren.

Neben der Erweiterung des Ansatzes auf die Schätzung unbekannter Eingangssignale [7, 10] bilden die Arbeiten [7, 8] die Grundlage zur MF-basierten Rekonstruktion von Zuständen von LTI-Systemen. Der Entwurf von Beobachtern spielt eine wesentliche Rolle beim Aufbau einer Regelungsarchitektur, für die nun auch das algebraische Lösungsverfahren mittels MFM genutzt werden kann. Durch die Integraltransformation wird der Differentialoperator in einer adjungierten Form auf den Modulationskern übertragen [12], was auf der zugrundeliegenden linearen Form beruht. Insbesondere die geschickte Wahl der Randbedingungen ist dabei von großer Bedeutung, um die gewünschten Informationen extrahieren zu können und die Lösbarkeit des entstehenden Gleichungssystems zu garantieren [9]. Bei der Erweiterung auf lineare zeitvariante Systeme (LTV) spielt die Betrachtung des Zusammenhangs zum entsprechenden Eingangs-/Ausgangs-Verhalten eine wesentliche Rolle [12]. Mit Hilfe der korrespondierenden Beobachtungsnormalform wird eine Strukturierung des zeitabhängigen Differentialoperators vorgenommen, die die Anwendung der MFM ermöglicht und vereinfacht. Analog zur Lyapunov-Transformations-basierten Perspektive kann hierbei auch eine Verbindung zur Methode der Beobachtbarkeits- bzw. Rekonstruierbarkeits-Gramschen festgestellt werden. Die Arbeit [5] zeigt bereits eine direkte Verbindung zwischen dieser klassischen Betrachtungsweise und algebraischen Ansätzen auf gleitenden Horizonten auf. In der Tat funktionieren der Schätzmechanismus und die Implementierung auf eine äquivalente Weise. Durch die Verwendung von Hilfsproblemen, die sowohl von [6] für die Parameteridentifikation als auch von [13, 14] für die Fehlerdiagnose in endlich- und unendlich-dimensionalen Systemen etabliert wurde, kann beim MF-Beobachterentwurf eine direkte Gramsche Lösung konstruiert werden.

Da es sich bei der MFM um einen inhärenten linearen Mechanismus handelt, liegt zunächst nicht auf der Hand, wie die Behandlung von nichtlinearen Systemen vonstatten gehen kann. Ein zentraler Ansatz ist dabei die Überführung und Strukturierung der Systemdarstellung als lineare Form, wenn auch unter Umständen mit zeitvarianten Termen. Die ersten Arbeiten, die sich mit nicht direkt integrierbaren Strukturen beschäftigten, stammen von [3, 4]. Diese Methodik konnte in [11] auf eine Klasse von Lagrange Systemen erweitert werden. In [9] wird der Einfluss des klassischen Linearisierungsansatzes auf die Schätzung mittels gleitenden Horizonts untersucht.

Während des Vortrags wird ein Überblick zur Formulierung von MF-basierten Schätzver-

fahren für lineare System gegeben. Ein Fokus liegt dabei auf dem Umgang mit zeitvarianten Systemen zur Behandlung typischer Schätzprobleme. Weiterhin stellt der Beitrag den Übergang zur Betrachtung nichtlinearer Systemklassen dar und macht die MFM anhand ausgewählter Anwendungsszenarien deutlich.

## Literatur

- [1] Shinbrot, M.: On the analysis of linear and nonlinear dynamical systems from transient-response data, *NACA*, Washington D.C., Tech. Rep., 1954.
- [2] Loeb, J., Cahen, G.: Extraction, à partir des enregistrements de mesures, des paramètres dynamiques d'un système, *Automatisme*, 12, 1963.
- [3] Pearson, A.E.: Explicit parameter identification for a class of nonlinear input/output differential operator models, *31st IEEE CDC*, S. 3656–3660, 1992.
- [4] Patra, A., Unbehauen, H.: Identification of a Class of Nonlinear Continuous-Time Systems Using Hartley Modulating Functions, *International Journal of Control*, 62, S. 1431–1451, 1995.
- [5] Byrski, W.: The survey for the exact and optimal state observers in Hilbert spaces, *ECC*, S. 3548–3553, 2003.
- [6] Schmid, C., Roppenecker, G.: Parameteridentifikation für LTI-Systeme mit Hilfe signalmodellgenerierter Modulationsfunktionen, *AT*, 59, S. 521–528, 2011.
- [7] Liu, D., Laleg-Kirati, T.-M., Perruquetti, W., Gibaru, O.: Non-asymptotic state estimation for a class of linear time-varying systems with unknown inputs, *IFAC World Congress*, S. 3732–3738, 2014.
- [8] Jouffroy, J., Reger, J.: Finite-time simultaneous parameter and state estimation using modulating functions, *IEEE Conference on Control Applications*, S. 394–399, 2015.
- [9] Korder, K., Noack, M., Reger, J.: Non-asymptotic Observer Design for Nonlinear Systems Based on Linearization, *IEEE 61st CDC*, S. 615–621, 2022.
- [10] Noack, M., Botha, T., Hamersma, H.A., Ivanov, V., Reger, J., Els, S.: Road Profile Estimation with Modulation Function Based Sensor Fusion and Series Expansion for Input Reconstruction, *IEEE AMC*, S. 547–552, 2018.
- [11] Noack, M., Reger, J., Jouffroy, J.: Adaptive Velocity Estimation for Lagrangian Systems using Modulating Functions, *IEEE ICM*, S. 1–8, 2023.
- [12] Noack, M., N'Doye, I., Reger, J., Laleg-Kirati, T.-M.: Modulating function based algebraic observer coupled with stable output predictor for LTV and sampled-data systems, *arXiv*, 2024.
- [13] Fischer, F., Deutscher, J.: Flatness-Based Algebraic Fault Diagnosis for Distributed-Parameter Systems, *Automatica*, 117, S. 108987, 2020.
- [14] Fischer, F., Todorovski, V., Deutscher, J.: Fault Detection for Lumped-Parameter LTI Systems Using Integral Transformations and Trajectory Planning Methods, *International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems*, S. 79–84, 2021.

# Ein neuer Ansatz zur Selbstüberwachung von Filter- und Trackingverfahren mittels Subjective Logic

Thomas Griebel, Michael Buchholz und Klaus Dietmayer

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik  
Universität Ulm  
{thomas.griebel, michael.buchholz, klaus.dietmayer}@uni-ulm.de

**Schlüsselwörter:** Automatisiertes Fahren, Objekt-Trackingverfahren, Kalman-Filter, Selbstüberwachung, Subjective Logic

Die Sicherheit und Robustheit automatisierter Systeme, die in direkter Interaktion mit Menschen stehen, wie beispielsweise automatisierte Fahrzeuge, stellen wesentliche Herausforderungen dar. Diese können nur durch effektive Selbstüberwachungs- oder Selbstbewertungsmethoden gemeistert werden. Selbstüberwachung ermöglicht eine kontinuierliche Leistungsüberprüfung einzelner Module und ihrer Annahmen innerhalb der Automatisierungsfunktion. Ein umfassender Selbstüberwachungsansatz ist nicht nur theoretisch von Bedeutung, sondern wird bei automatisierten Fahrzeugen auch durch aktuelle Sicherheitsstandards wie die ISO/PAS 21448 (SOTIF) [1] und gesetzliche Vorgaben wie die deutschen "Autonome Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung - AFGBV" [2] gefordert.

Eine wichtige Komponente in der Fahrzeugautomatisierung ist die zeitliche Verfolgung von Objekten in der Umgebung, auch Tracking genannt. Einer der bekanntesten Trackingalgorithmen ist das Kalman-Filter [3]. In diesem Vortrag wird ein ganzheitliches und flexibles Framework für die Selbstüberwachung von Filter- und Trackingalgorithmen vorgestellt, welches die Zuverlässigkeit und Sicherheit automatisierter Fahrsysteme steigert.

Herkömmliche Ansätze zur Bewertung von Filtern, wie der „Normalized Innovation Squared (NIS)“-Konsistenztests [4], überprüfen zwar einzelne Aspekte der Filterverfahren, ein modulares und ganzheitliches Konzept zur Selbstüberwachung von Trackingalgorithmen fehlt jedoch in der Literatur. Der hier vorgestellte neuartige Ansatz ermöglicht die Überwachung von Trackingalgorithmen unter Verwendung der „Subjective Logic“ [5]. Diese erweitert die Wahrscheinlichkeitstheorie, indem sie Unsicherheiten und fehlende Informationen explizit berücksichtigt. Diese Methode wird genutzt, um die Annahmen von Trackingalgorithmen dynamisch zu überprüfen und Unsicherheiten zu quantifizieren. „Subjective Logic“ bietet eine vielversprechende Grundlage für die Entwicklung eines modularen und erweiterbaren Selbstüberwachungs-Frameworks.

Der Schwerpunkt dieses Vortrages liegt auf der Entwicklung eines generischen Selbstüberwachungsmoduls für die Filteraufgabe der Einzelobjektverfolgung in Clutter-Umgebungen, also der Verfolgung von Objekten unter Berücksichtigung von Fehl- und Falschmessungen. Dabei handelt es sich um einen Spezialfall der Mehrobjektverfolgung, bei der immer genau ein Objekt vorhanden ist. Basierend auf einem selbstbewertenden Kalman-Filter-Ansatz wird ein umfassendes Selbstüberwachungsmodul für die Einzelobjektverfolgung in einer Umge-

bung mit Clutter vorgeschlagen. Das entwickelte Modul bietet nicht nur eine Gesamtbewertung des Trackingalgorithmus, sondern analysiert auch spezifische Zuverlässigkeitsaspekte des Algorithmus und seiner Annahmen, wie etwa verrauschte Messungen, die Modellierung von Fehlmessungen und unbekannte Datenassoziationen.

Der vorgeschlagene Selbstüberwachungsansatz wurde auf gängige Tracking-Assoziationsverfahren, darunter den „Nearest Neighbor“-Algorithmus [6] und den „Probabilistic Data Association“-Algorithmus [7], angewendet. Die Evaluation erfolgte anhand von Simulationen sowie realen Daten eines automatisierten Versuchsträgers, wodurch seine praktische Anwendbarkeit bestätigt wurde.

## Literatur

- [1] International Organization for Standardization. „ISO/PAS 21448: Road Vehicles – Safety of the Intended Functionality.“ In: ISO, Publicly Available Specification, 2019.
- [2] Bundesministerium der Justiz sowie das Bundesamt für Justiz. „Verordnung zur Genehmigung und zum Betrieb von Kraftfahrzeugen mit autonomer Fahrfunktion in festgelegten Betriebsbereichen (Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung - AFGBV).“ 2022. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/afgbv/AFGBV.pdf> (zuletzt besucht am 04.12.2024).
- [3] Kalman, Rudolph E. „A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems.“ In: Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering, volume 82, no. 1, pages 35–45, 1960.
- [4] Bar-Shalom, Yaakov; Li, X. Rong; und Kirubarajan, Thiagalingam. „Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms and Software.“ John Wiley & Sons, 2001.
- [5] Jøsang, Audun. „Subjective Logic: A Formalism for Reasoning Under Uncertainty.“ Springer International Publishing, 2016.
- [6] Bar-Shalom, Yaakov; und Li, Xiao-Rong. „Multitarget-multisensor Tracking: Principles and Techniques.“ Volume 19. YBs Storrs, CT, 1995.
- [7] Bar-Shalom, Yaakov; Daum, Fred; und Huang, Jim. „The Probabilistic Data Association Filter.“ In: IEEE Control Systems Magazine, volume 29, no. 6, pages 82–100, 2009.

# Automatische Modelladaption für modulare Produktionsanlagen mit Digitalen Zwillingen

Daniel Dittler

Institut für Automatisierungstechnik und  
Softwaresysteme, Universität Stuttgart  
daniel.dittler@ias.uni-stuttgart.de

Michael Weyrich

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

**Schlüsselwörter:** Digitaler Zwilling, Modelladaption, modulare Produktionsanlagen, PtX-Plattformen

Die Kompensation von Störungen in modularen Produktionsanlagen erfordert Lösungen, um die zunehmende Komplexität entlang der eng vernetzten und hochdynamischen Einzelprozesse beherrschbar zu machen. Digitale Zwillinge spielen dabei eine zentrale Rolle, da sie Modelle für unterschiedliche Anwendungen, wie die prädiktive Regelung oder die betriebsparallele Simulation, bereitstellen können. Diese Anwendungen ermöglichen es, mögliche Kompensationen experimentell zu prüfen und die Produktionsanlage anschließend gezielt auf gewünschte Sollwerte einzustellen. Unterschiedliche Störgrößen erfordern eine automatische Modelladaption der Modelle im Digitalen Zwillingen, um wechselnde Systembedingungen und Umgebungen bei der Anpassung der Regelung von Produktionsanlagen zu berücksichtigen. Je nach Anwendung oder Art der Störung unterscheiden sich die Anforderungen an die Modelle jedoch erheblich, insbesondere hinsichtlich ihrer Genauigkeit und der benötigten Rechenzeit. In diesem Beitrag wird daher ein Ansatz vorgestellt, der auf Digitalen Zwillingen basiert und die Regelung um eine iterative Modelladaption erweitert. Diese Adaption ermöglicht eine kontinuierliche Anpassung der Modelle an sich ändernde Systembedingungen und Umgebungen. Zur Realisierung wurde eine Methode entwickelt, die eine automatische Modelladaption unterstützt. Diese Methode wurde um einen Knowledge-Graphen erweitert. Dieser stellt das notwendige Wissen über die Modelleigenschaften bereit und ermöglicht darüber hinaus die dynamische Erweiterung des Wissens während der Modelladaption. Auf diese Weise kann gelernt werden, welche Modellanpassungen notwendig sind, um spezifische Szenarien bzw. Störungen effektiv zu kompensieren, während gleichzeitig Rechenzeiten und benötigte Ressourcen optimiert werden. Der vorgestellte Ansatz wird an einer modularen Produktionsanlagen im Kontext von Offshore Power-to-X (PtX) Plattformen prototypisch umgesetzt und evaluiert.

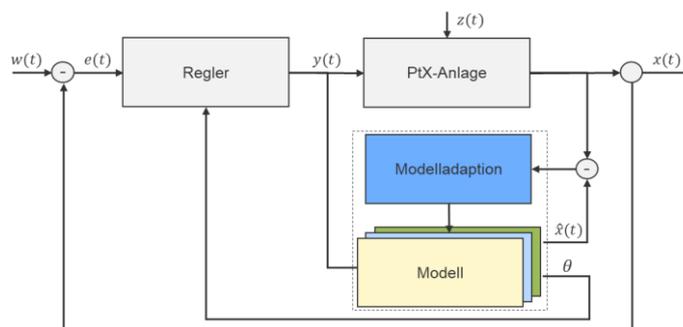


Abbildung 1 Ansatz zur automatischen Modelladaption mit Digitalen Zwillingen von Power-to-X-Produktionsplattformen

## Literatur

- [1] D. Dittler, et al. „A Novel Model Adaption Approach for intelligent Digital Twins of Modular Production Systems“. In: 2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE, 2023.
- [2] D. Dittler, et al. „Automated Configuration of Behavior Models in Digital Twins based on a Knowledge-Graph“. In: 57th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS 2024).

# Zur nichtlinearen fraktionalen Modellierung von Batteriezellen

Lukas Tappeiner

Automatisierungs- und Regelungstechnik  
UMIT TIROL  
lukas.tappeiner@umit-tirol.at

Frank Woittennek

Automatisierungs- und Regelungstechnik  
UMIT TIROL  
frank.woittennek@umit-tirol.at

**Schlüsselwörter:** fraktionale Übertragungsfunktion, Realisierung, unendlichdimensionale Batteriemodelle

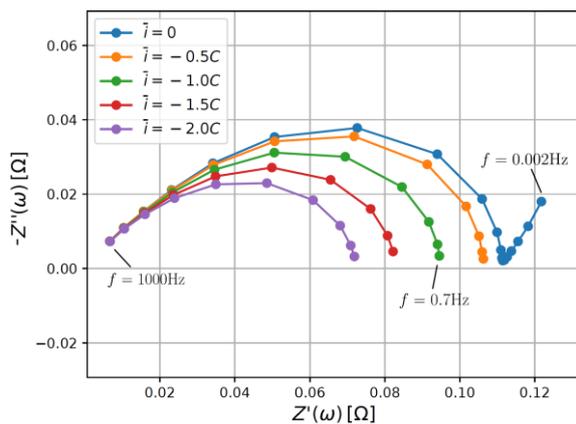


Abbildung 1: Impedanzmessung in verschiedenen Arbeitspunkten

Ortskurven dargestellt, wobei jeweils unterschiedliche Arbeitspunkte betrachtet werden. Die Ortskurven stauchen sich in Abhängigkeit vom Arbeitspunktstrom. Die Impedanz in einem bestimmten Arbeitspunkt, also das Kleinsignalverhalten der Lithium-Ionen-Zellen, kann durch Ersatzschaltbildmodelle nachgebildet werden. Ein solches Modell ist in Abb. 2 dargestellt, wobei der Arbeitspunkt  $\bar{i} = 0$  betrachtet wird. Dieses Modell wird R-RQ-W-Modell bezeichnet. Seine Impedanz ist durch

$$Z_1(j\omega) = R_i + \frac{R_l}{1 + R_l Q_l(j\omega)^\alpha} + \frac{1}{Q_w(j\omega)^{\alpha_w}}$$

gegeben. Eine erweiterte Version dieses Modells ist das R-RQ-RQ-W-Modell, welches in Abb. 3 zu sehen ist. Dieses Modell besitzt mehr Freiheitsgrade wodurch, wie aus der Abbildung ersichtlich, die zugrunde liegende Impedanz genauer rekonstruiert werden kann. Die Impedanz des R-RQ-RQ-W-Modell ist durch

$$Z_2(j\omega) = R_i + \frac{R_{1,l}}{1 + R_{1,l} Q_{1,l}(j\omega)^{\alpha_1}} + \frac{R_{2,l}}{1 + R_{2,l} Q_{2,l}(j\omega)^{\alpha_2}} + \frac{1}{Q_w(j\omega)^{\alpha_w}}$$

gegeben. Zur Beschreibung der übrigen Impedanzen aus Abb. 1 müssen die Parameter der Ersatzschaltbildmodelle in Abhängigkeit vom betrachteten Arbeitspunkt angepasst werden. Beide eingeführten Ersatzschaltbildmodelle weisen ein fraktionales Verhalten auf. Das bedeutet, die Exponenten  $\alpha$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  und  $\alpha_w$  sind positive reelle Zahlen. Die fraktionalen Impedanzen lassen sich durch die Beziehung

Die Impedanzmessung stellt eine einfache Möglichkeit zur Vermessung von Batteriezellen und zur Charakterisierung ihres dynamischen Verhaltens dar. Lithium-Ionen-Zellen weisen ein nichtlineares Strom-Spannungsverhalten auf, welches insbesondere bei niedrigen Temperaturen deutlich ausgeprägt ist. Diese Nichtlinearität wird sichtbar, wenn die Impedanz der Batterie in verschiedenen Arbeitspunkten betrachtet wird. In Abb. 1 wird dies deutlich, hier werden die Impedanzen in Form von Nyquist-

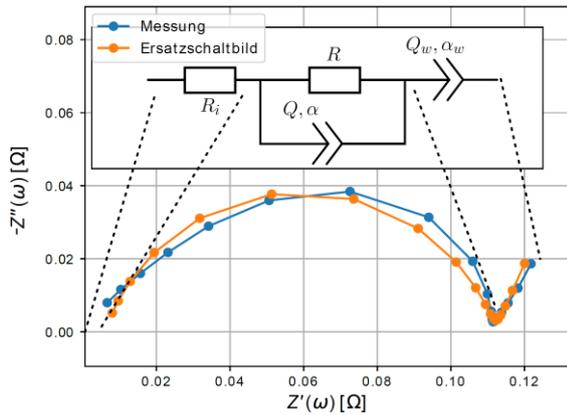


Abbildung 2: R-RQ-W im Arbeitspunkt  $\bar{i} = 0$

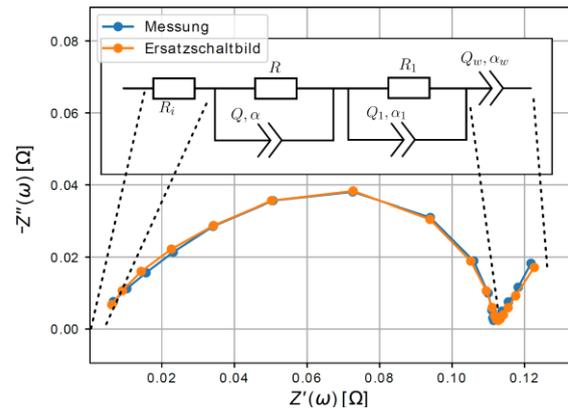


Abbildung 3: R-RQ-RQ-W im Arbeitspunkt  $\bar{i} = 0$

$$\frac{1}{(j\omega)^\alpha} = \int_0^\infty \frac{\mu_\alpha(\lambda)}{j\omega + \lambda} d\lambda = \int_0^\infty \frac{\sin(\alpha\pi)}{\pi\lambda^\alpha} \frac{1}{j\omega + \lambda} d\lambda$$

umformulieren. Diese Umformulierung [1] beinhaltet zwar ein Integral, in dem jedoch keine nichtganzzahligen Exponenten mehr auftreten. Dies ermöglicht die Realisierung der fraktionalen Übertragungsfunktionen  $Z_1(j\omega)$ , sowie  $Z_2(j\omega)$  in Form von unendlichdimensionalen Zustandsraummodellen [2]. Für jeden vermessenen Arbeitspunkt in Abb. 1 kann eine entsprechende Realisierung angegeben werden. Basierend auf diesen Realisierungen des Kleinsignalverhaltens wird eine modellbasierte Interpolation vorgeschlagen, welche das zugrunde liegende nichtlineare System rekonstruiert (vgl. [3]). Das erste Modell basiert auf dem R-RQ-W, das zweite auf dem R-RQ-RQ-W. Im Vortrag werden somit Modelle präsentiert, die das nichtlineare Verhalten von Lithium-Ionen-Batterien auf der Grundlage ihres fraktionalen Kleinsignalverhaltens nachbilden. Die in Abb. 1 dargestellten Frequenzgänge wurden anhand der Implementierung des Doyle-Fuller-Newman-Modells [4] in der Toolbox PyBaMM [5] erzeugt.

## Literatur

- [1] M. Montseny. „Diffusive representation of pseudo-differential time-operators“. In: *Esaim: Proceedings* 5. 1998.
- [2] R. F. Curtain and H. Zwart, „An Introduction to Infinite-Dimensional Linear Systems Theory“. In: *Texts in Applied Mathematics*. 1st ed. Springer, New York, NY, 1995.
- [3] L. Tappeiner, M. Oldenburger, B. Bedürftig, and F. Woittennek, „A new approach to modeling and simulation of the nonlinear, fractional behavior of Li-ion battery cells“. In: *Journal of Energy Storage*, vol. 50, 2022.
- [4] M. Doyle, T. F. Fuller, und J. Newman, „Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/Insertion Cell“. In: *Journal of The Electrochemical Society*. 1993
- [5] V. Sulzer et al., „Python Battery Mathematical Modelling (PyBaMM)“. In: *Journal of Open Research Software*, Bd. 9, Nr. 1, 2021

# Selbstüberwachtes Lernen latenter Zustandsraumdarstellungen zur Modellierung und Regelung dynamischer Systeme

Jonas Ulmen

Lehrstuhl für Elektromobilität  
Rheinland-Pfälzische Technische Universität  
Kaiserslautern-Landau  
jonas.ulmen@rptu.de

Daniel Görge

Lehrstuhl für Elektromobilität  
Rheinland-Pfälzische Technische Universität  
Kaiserslautern-Landau  
daniel.goerges@rptu.de

**Schlüsselwörter:** Zustandsraummodelle, Neuronale Netze, Selbstüberwachtes Lernen, Dynamische Systeme

Die zunehmende Komplexität von Regelungsaufgaben erfordert neue Ansätze zur Modellierung dynamischer Systeme. Die Identifikation von Zustandsraummodellen für komplexe Regelungsfragestellungen, beispielsweise die Manipulation verformbarer Objekte oder das automatisierte Fahren in unstrukturierten Umgebungen, stellt noch immer eine große Herausforderung dar. Dieser Beitrag möchte Potentiale des selbstüberwachten Lernens aufzeigen, um aus beliebigen Beobachtungsdaten wohlstrukturierte kontinuierliche Zustandsraummodelle zu lernen.

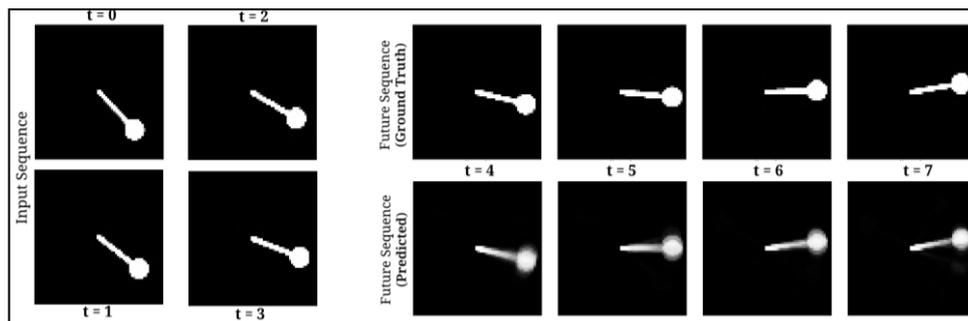


Abbildung 1: Rekonstruktion der latenten Zustandsprädiktion im Bildraum.

Selbstüberwachtes Lernen (Self-Supervised Learning, SSL) [1], [2], [3] ist ein Paradigma des maschinellen Lernens, bei dem ein System aus ungelabelten Daten lernt, indem es sich selbst Überwachungssignale aus den inhärenten Strukturen und Zusammenhängen der Daten generiert. Im Gegensatz zum überwachten Lernen, das große Mengen manuell gelabelter Trainingsdaten benötigt, und Reinforcement Learning, das auf Trial-and-Error und Belohnungssignale angewiesen ist [4], kann SSL unmittelbar aus rohen, ungelabelten Daten lernen. Dies ist besonders vorteilhaft, da ungelabelte Daten meist in großen Mengen verfügbar sind und keine aufwändige manuelle Annotation erfordern. SSL fokussiert sich dabei auf das Lernen allgemeiner aufgabenunabhängiger Repräsentationen, die für verschiedene nachgelagerte Aufgaben (Downstream Tasks) nützlich sein können. Im Kontext von Joint-Embedding-Predictive-Architectures (JEPA) wird dieser Ansatz genutzt, um aus rohen Daten unmittelbar informative Zustandsraumdarstellungen zu lernen, ohne explizite Rekonstruktion und ohne manuelle Verzerrung und Augmentierung der Eingangsdaten [5].

Die in dem Beitrag besprochenen Methoden betten Beobachtungssequenzen in einen strukturierten latenten Zustandsraum ein, indem beispielsweise kontraktive Eigenschaften für die Einbettungen und Lipschitz-Konstanten für die Zustandsübergänge erzwungen werden. Diese

formalen Eigenschaften können den Einsatz klassischer regelungstechnischer Methoden im gelernten Zustandsraum ermöglichen und erleichtern die Integration neuronaler gewöhnlicher Differentialgleichungen (Neural ODEs) [6] für Vorhersagen. Die Methodik unterscheidet sich von bestehenden Ansätzen [7], [8] insbesondere durch ihre rekonstruktionsfreie Architektur und die explizite Berücksichtigung der Dynamik.

Eine experimentelle Studie anhand eines einfachen Pendelsystems zeigt, dass die vorgestellten Ansätze in der Lage sind, aus Bilddaten latente Zustandsraummodelle zu generieren, wie in Abbildung 1 veranschaulicht. Dies ebnet den Weg für die Entwicklung allgemeinerer Regelungsalgorithmen und Schätzmethoden mit vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten und eröffnet neue Perspektiven für die Regelung komplexer dynamischer Systeme. Die Methodik vereint dabei die Vorteile moderner selbstüberwachter Lernverfahren mit den theoretischen Garantien klassischer regelungstechnischer Ansätze und bietet vielversprechende Möglichkeiten für die Integration in bestehende Regelungsarchitekturen.

## Literatur

- [1] Y. LeCun. „A Path Towards Autonomous Machine Intelligence“. In: *OpenReview*, version 0.9.2, 2022-06-27, 2022.
- [2] A. Bardes, J. Ponce und Y. LeCun. „VICReg: Variance-Invariance-Covariance Regularization for Self-Supervised Learning“. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2022.
- [3] T. Chen, S. Kornblith, M. Norouzi und G. Hinton. „A Simple Framework for Contrastive Learning of Visual Representations“. In *Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning (PMLR)*, S. 1597–1607, 2020.
- [4] N. Hansen, X. Wang und H. Su. „Temporal Difference Learning for Model Predictive Control“. In: *Proceedings of the 39th International Conference on Machine Learning (PMLR)*, S. 8387–8406, 2022.
- [5] A. Bardes, Q. Garrido, J. Ponce, X. Chen, M. Rabbat, Y. LeCun, M. Assran und N. Ballas. „Revisiting Feature Prediction for Learning Visual Representations from Video“. In: *arXiv*, arXiv:2404.08471, 2024.
- [6] R. T. Q. Chen, Y. Rubanova, J. Bettencourt und D. Duvenaud. „Neural Ordinary Differential Equations“. In: *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, Bd. 31, 2018.
- [7] M. Watter, J. T. Springenberg, J. Boedecker, und M. Riedmiller. „Embed to Control: A Locally Linear Latent Dynamics Model for Control from Raw Images“. In: *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, Bd. 28, 2015.
- [8] J. Z. Kolter und G. Manek. „Learning Stable Deep Dynamics Models“. In: *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, Bd. 32, 2019.

# Inverse stochastische Optimalregelung

Philipp Karg

Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme  
Karlsruher Institut für Technologie  
philipp.karg@kit.edu

Sören Hohmann

Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme  
Karlsruher Institut für Technologie  
soeren.hohmann@kit.edu

**Schlüsselwörter:** Stochastische Optimalregelung, inverse dynamische Optimierung, Modellierung und Identifikation menschlicher Bewegungen

Mathematische Modelle zur Prädiktion menschlicher Bewegungen haben in den letzten Jahren signifikant an Relevanz gewonnen. Die zunehmende Erforschung und Verbreitung von Systemen, die eine enge Interaktion zwischen Mensch und Maschine anstreben, wie Cobots oder Exoskelette in der Produktions-, Bau- oder Medizintechnik, erfordern zum Design der Automation der Maschine eine Möglichkeit menschliche Bewegungen und deren natürliche Variabilität möglichst genau präzisieren zu können [1].

Das Modell soll dabei präzise, generalisierbar über verschiedene Aufgaben und Nutzer sowie interpretierbar bezüglich seiner Parameter sein. Die Interpretierbarkeit der Modellparameter ermöglicht hierbei eine Übertragung und Anpassung des Modells auf neue Aufgaben und Nutzer ohne eine erneute Parameteridentifikation. Interpretierbare Modellparameter sind aber auch für die Parametrierung der unterstützenden Automation unerlässlich, sodass die Einheit aus Mensch und Maschine eine Aufgabe optimal, sich ergänzend und unter ergonomischer Optimalität für den Menschen ausführt.

Black-Box-Modelle (s. z.B. [2]) zeigen weder die geforderte Generalisierbarkeit noch besitzen sie interpretierbare Modellparameter. White-Box-Modelle beschreiben die Optimalitätsprinzipien des Menschen bei der Wahl seiner Bewegungstrajektorien und der Ausführung seiner Bewegungen in Form von dynamischen Optimierungsproblemen. State-of-the-Art-Modelle berücksichtigen zudem die natürlichen Rauschprozesse in der menschlichen Biomechanik und Perzeption [3]. Da sowohl die Optimalitätsprinzipien als auch die Skalierungsparameter der Rauschprozesse des Menschen unbekannt sind, müssen diese aus Messdaten identifiziert werden, um Prädiktionen mit dem Modell oder das Design einer unterstützenden Automation durchführen zu können. Hierbei ergibt sich ein neues inverses dynamisches Optimierungsproblem, nämlich die Bestimmung der Gütemaß- und Rauschprozessparameter von stochastischen Optimalreglern aus menschlichen Messdaten. Existierende Verfahren der inversen dynamischen Optimierung können bisher nur die Gütemaßparameter von deterministischen Optimalreglern (Inverse Optimal Control, s. z.B. [4]) oder die Parameter der Reward-Funktion eines Markov Decision Process (Inverse Reinforcement Learning, s. z.B. [5]) bestimmen.

Die neu entwickelten inversen dynamischen Optimierungsverfahren der sogenannten inversen stochastischen Optimalregelung [6,7] ermöglichen erstmalig die Identifikation der Gütemaß- und Rauschprozessparameter von stochastischen Modellen zur Beschreibung menschlicher Bewegungen, sodass die Modellprädiktionen bestmöglich mit Messdaten übereinstimmen. Sie ermöglichen somit auch eine quantitative Analyse dieser Modelle bezüglich der oben geforderten Eigenschaften Präzision, Generalisierbarkeit und Interpretierbarkeit.

Beispielhaft zeigt Abbildung 1 die Messung der Handposition eines Probanden bei der wiederholten Ausführung einer planaren Punkt-zu-Punkt-Bewegung (Zielpunkt dargestellt als blaues Kreuz), wobei in grau die einzelnen Wiederholungen und in schwarz der Mittelwert abgebildet sind. Die Prädiktionen verschiedener Modelle mit ihren identifizierten bestmöglichen Parametern sind farblich aufgetragen. Zum einen zeigt sich, dass das aktuell am weitesten verbreitete State-of-the-Art-Modell nach Todorov [3] (LQS) ein rein deterministisches Modell (LQ) übertrifft, was die Notwendigkeit der Berücksichtigung der menschlichen Rauschprozesse in der Modellierung unterstreicht. Zum anderen kann ein auf Basis der quantitativen Analyse neu entworfenes erweitertes Modell (LQS+) eine nochmals genauere Prädiktion und eine exakte Übereinstimmung mit den menschlichen Messdaten erreichen. Insbesondere das Geschwindigkeitsprofil der Bewegungen wird durch das erweiterte Modell präziser prädiziert.

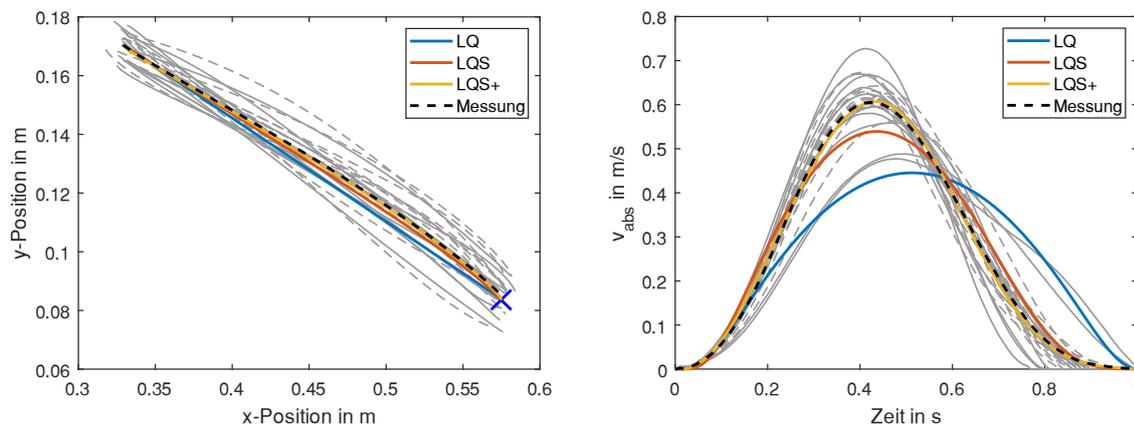


Abbildung 1: Modellprädiktionen und menschl. Messdaten einer planaren Punkt-zu-Punkt-Bewegung.

## Literatur

- [1] S. Hirche, A. Ames, T. Samad, A. Fontan und F. Lamnabhi-Lagarrigue, „Cyber-Physical-Human Systems“. In: *Control for Societal-Scale Challenges: Road Map 2030*, IEEE CSS, 2023.
- [2] S. Ross und J. A. Bagnell, „Efficient Reductions for Imitation Learning“. In: *13<sup>th</sup> International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, 2010.
- [3] E. Todorov und M. I. Jordan, „Optimal Feedback Control as a Theory of Motor Coordination“. In: *Nature Neuroscience*, 2002.
- [4] T. L. Molloy, J. Inga Charaja, S. Hohmann und T. Perez, „Inverse Optimal Control and Inverse Noncooperative Dynamic Game Theory“, Springer, 2022.
- [5] A. Boularias, J. Kober und J. Peters, „Relative Entropy Inverse Reinforcement Learning“. In: *14<sup>th</sup> International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, 2011.
- [6] P. Karg, S. Stoll, S. Rothfuß und S. Hohmann, „Inverse Stochastic Optimal Control for Linear-Quadratic Gaussian and Linear-Quadratic Sensorimotor Control Models“. In: *61<sup>st</sup> IEEE Conference on Decision and Control*, 2022.
- [7] P. Karg, M. Hess, B. Varga und S. Hohmann, „Bi-Level-Based Inverse Stochastic Optimal Control“. In: *22<sup>nd</sup> European Control Conference*, 2024.

# Control and Controllability of Open Multi-Agent Systems

Vincent Schmidtke

Regelungs- und Systemtheorie  
Elektrotechnik/Informatik  
Universität Kassel  
v.schmidtke@uni-kassel.de

Olaf Stursberg

Regelungs- und Systemtheorie  
Elektrotechnik/Informatik  
Universität Kassel  
stursberg@uni-kassel.de

**Keywords:** Multi-Agent Systems, Time-Varying Systems, Network Analysis, Controllability.

This contribution considers multi-agent systems which are often understood as sets of dynamic subsystems with units of own decision-making to achieve common goals based on interaction. The interaction can be established by shared knowledge using communication between neighbors. While most publications on this subject address time-invariant structures, or variation only with respect to the communication links, the term *open multi-agent systems* refers to the additional property that new agents can join and/or leave the current network [1]. In fact, the consideration of varying numbers of agents is realistic for many real-world multi-agent systems, such as traffic systems, groups of unmanned aerial or ground vehicles, or also social networks.

The particular challenge in analyzing and controlling open multi-agent-systems is that the time-varying system dimension may compromise the ability to obtain convergence towards the control goals. Different properties and concepts established for multi-agent systems with invariant number of agents need to be extended if transferred to open multi-agents systems [2]. In order to maintain global system properties, a possible principle in these efforts is to minimally change the affected structures, such as controllers or the communication network, when an agent joins or leaves. Along this line, the talk presents the results published in [3] and [4] on resilience and controllability in open multi-agent systems with a focus on network topological aspects.

Using an average-consensus protocol, the first part investigates how resilience to a given number of leaving agents can be specified and maintained in an open system setting by appropriate topology design and reconfiguration. The problem is solved using mixed-integer optimization, keeping the complexity of the optimization low to respond quickly to changes in the number of agents.

In the second part, structural controllability of the same class of systems is studied by use of graph-theoretic methods. The special setting considered here is that only a subset of agents (the *leaders*) have a control input, while the remaining ones (the *followers*) react to the behavior of the leaders. This setting is relevant in robot swarms [5] and in pinning control [6], where the goal is to control larger sets of agents through only influencing a relatively small subset of agents. Since leader selection maybe challenging (even for time-invariant network topologies [5]), the proposed solution consists of principles and algorithmic implementations to maintain structural controllability with the same set of leaders if the sets of agents changes.

## Literature

- [1] J.M. Hendrickx and S. Martin. „Open multi-agent systems: Gossiping with deterministic arrivals and departures”. In: Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing. p. 1094-1101, 2016.
- [2] C. Monnoyer de Galland and J.M. Hendrickx. „Fundamental performance limitations for average consensus in open multi-agent systems”. In: IEEE Trans. on Automatic Control, 68(2), p. 646-659, 2023.
- [3] V. Schmidtke, Z. Liu and O. Stursberg. „Resilience of Time-Varying Communication Graphs for Consensus of Changing Sets of Computing Agents”. In: 62<sup>nd</sup> IEEE Conf. on Decision and Control, p. 3474-3479, 2023.
- [4] V. Schmidtke, R. K. Al-Maqdad and O. Stursberg. „Maintaining Strong Structural Controllability for Multi-Agent Systems with Varying Number of Agents”. In: 63<sup>rd</sup> IEEE Conf. on Decision and Control, to appear, 2024.
- [5] A. Kolling, P. Walker, N. Chakraborty, K. Sycara and M. Lewis. „Human Interaction with Robot Swarms: A survey”. In: Trans. on Human-Machine Systems, 46(1), p. 9-26, 2016.
- [6] F. Sorrentino, M. di Bernardo, F. Garofalo and G. Chen. „Controllability of Complex Networks via Pinning”. In: Physical Review E, 75(4), p. 046103.1-046103.6, 2007.

# Model-free adaptive control and extensions

Soheil Salighe

Chair of Dynamics and Control  
University of Duisburg-Essen  
soheil.salighe@uni-due.de

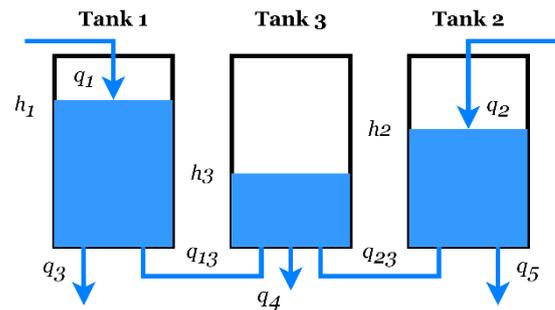
Dirk Söffker

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

**Keywords:** Model-free adaptive control, Multi-model, Nonlinear system

Model-free adaptive control (MFAC), introduced by Hou and Jin [1], is a data-driven control method that transforms unknown nonaffine nonlinear discrete-time systems into equivalent dynamic linearization data models [2]. These models—compact, partial, and full-form dynamic linearization (CFDL, PFDL, and FFDL)—vary in their handling of input/output (I/O) data, with CFDL considering only current input increments, PFDL using a window of past input increments, and FFDL including both current and past I/O increments. The MFAC approach addresses key model-based control challenges like accurate modeling versus reduction and unmodeled dynamics versus robustness. Its adaptable structure also allows integration with other control approaches [3].

The existing literature on MFAC reveals a gap in exploring the incorporation of system knowledge into its methodology. Due to the structural similarity between FFDL and ARX, this work aims to develop an approach combining a multi-model (MM) framework within MFAC, which can provide a novel FFDL data model with more global knowledge—at various operating points across the operating surface—rather than a non-physical approximation of the actual system. The proposed Multi-ARX MFAC preserves the data-driven characteristics of conventional FFDL-MFAC if the operating points of the nonlinear system change over time.



The proposed controller is applied to a nonlinear MIMO three-tank system (3TS). The results show that the Multi-ARX MFAC can consistently track the desired references for an unknown MIMO system with slightly better efficiency than conventional MFAC-FFDL while incorporating local information from the nonlinear system through weighted local ARX coefficients at various operating points. The authors aim to extend the Multi-ARX MFAC concept to improve the prediction ability of the Model-Free Adaptive Predictive Control (MFAPC) [4].

## Literature

- [1] Z. Hou and S. Jin, "Model free adaptive control." CRC press Boca Raton, FL, USA, 2013.
- [2] R. Chi, H. Zhang, H. Li, B. Huang, and Z. Hou, "Data-driven dynamic internal model control," *IEEE Transactions on Cybernetics*, pp. 1–13, 2024.
- [3] Y. Yang, C. Chen, and J. Lu, "An improved partial-form MFAC design for discrete-time nonlinear systems with neural networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 41441–41455, 2021.
- [4] Y. Guo, Z. Hou, S. Liu, and S. Jin, "Data-driven model-free adaptive predictive control for a class of MIMO nonlinear discrete-time systems with stability analysis," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 102852–102866, 2019.