

Programmheft Kurzfassungen

Verein Deutscher Ingenieure
Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

VDI/VDE-Gesellschaft Mess- & Automatisierungstechnik (VDI/VDE-GMA)

IFAC International Federation of Automatic Control



GMA-Fachausschuss 2.14

Systemtheorie und Regelungstechnik
21. bis 22. September 2026

GAMM-Fachausschuss

Dynamik und Regelungstheorie
23. September 2026

GMA-Fachausschuss 2.13

Modellbildung, Identifikation und Simulation
in der Automatisierungstechnik
23. bis 25. September 2026



Organisation des GMA-FA 2.14

Prof. Dr.-Ing. habil. Joachim Deutscher
Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
Universität Ulm
E-Mail: joachim.deutscher@uni-ulm.de



universität
uulm

Organisation des GAMM-FA

Prof. Dr. Kathrin Flaßkamp
Professur für Modellierung und Simulation
technischer Systeme
Universität des Saarlandes
E-Mail: kathrin.flaskkamp@uni-saarland.de



UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES

Jun.-Prof. Dr. Manuel Schaller
Juniorprofessur Numerische Mathematik
Technische Universität Chemnitz
E-Mail: manuel.schaller@math.tu-chemnitz.de



Prof. Dr.-Ing. Merten Stender
Fachgebiet Cyber-Physical Systems
in Mechanical Engineering
Technische Universität Berlin
E-Mail: merten.stender@tu-berlin.de



Organisation des GMA-FA 2.13

Dr. Jens Saak
Computational Methods in Systems and Control Theory
Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer
technischer Systeme Magdeburg
E-Mail: saak@mpi-magdeburg.mpg.de



MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR DYNAMIK KOMPLEXER
TECHNISCHER SYSTEME
MAGDEBURG

Prof. Dr.-Ing. Jörg Fehr
Institut für Technische und Numerische Mechanik
Universität Stuttgart
E-Mail: joerg.fehr@itm.uni-stuttgart.de



Universität
Stuttgart



Tagungsprogramm
mit Kurzfassungen

Tagungsprogramm

Sonntag 20.09.2026 (Anreisetag)

ab 18:30 Abendessen

Montag 21.09.2026 (GMA-FA 2.14)

08:00 – 08:20	Begrüßung der Teilnehmer des GMA-FA 2.14 <i>J. Deutscher (Uni Ulm)</i>
08:20 – 08:45	Reglerentwurf für asymptotische Störkompensation – Der allgemeine Fall <i>P. Hippe (FAU Erlangen)</i>
08:45 – 09:20	Legendre-Tau als Zustandsraumrealisierung für Padé-Approximationen von Totzeitsystemen <i>T. Scholl, L. Gröll (KIT)</i>
09:20 – 09:45	Regelung einer Klasse nichtlinearer Konvektions-Reaktions-Systeme mit Speichereffekten und relativem Grad Eins <i>J. Wurm, F. Woittennek (UNIT Tirol)</i>
09:45 – 10:15	Kaffeepause
10:15 – 10:50	Nichtlineare Backstepping-Regelung semilinearer parabolischer Systeme <i>J. Deutscher, F. Ruchti (Uni Ulm)</i>
10:50 – 11:15	Backstepping und die strenge Rückkopplungsform hyperbolischer verteilt-parametrischer Systeme <i>N. Gehring (OVGU Magdeburg)</i>
11:15 – 11:50	Zur Flachheit des Timoshenko-Balkenmodells <i>F. Woittennek (UNIT Tirol)</i>
11:50 – 12:15	On Periodic Trajectories of Boundary-Controlled Nonlinear Euler Equations <i>A. Zuyev, P. Benner (MPI Magdeburg)</i>
12:15 – 14:00	Mittagessen
14:00 – 14:25	Datengetriebener Beobachterentwurf auf Basis von Mixture Networks für Systeme mit ununterscheidbaren Trajektorien <i>S. Eming, P. Jerono, Th. Meurer (KIT)</i>
14:25 – 14:50	Zustands- und Parameterschätzung in adaptiv gekoppelten Kuramoto-Oszillatoren <i>T. N. Lundt, A. Lepsien, A. Schaum (Uni Hohenheim)</i>
14:50 – 15:15	Hybrider Ansatz zur kombinierten Formations- und Containment-Regelung heterogener nichtlinearer Multiagentensysteme <i>A. Klyushina, L. Groß, J. Adamy (TU Darmstadt)</i>
15:15 – 15:50	Dreiecksformen für x -flache eingangsaffine Mehrgrößensysteme <i>G. Hartl, C. Gstöttner, M. Schöberl (JKU Linz)</i>
15:50 – 16:20	Kaffeepause
16:20 – 16:45	Zertifizierte Benchmarks für Reinforcement Learning mittels stochastischer konverser Optimalität <i>P. Osinenko (Uni Moskau), S. Ibrahim, G. Ouerdane, H. Ouerdane (CESS Moskau), S. Streif (TU Chemnitz)</i>
16:45 – 17:20	Periodicity and Nonsmoothness in Optimal Control: Applications to Legged Robotics <i>M. Raff (Uni Stuttgart)</i>
17:20 – 17:45	Datengetriebene Qualitätsregelung beim Spritzgießen mit Inline-Qualitätsmessung <i>C. Jung (TU Wien), T. Magyar, S. Strommer, T. Glück (AIT), W. Kemetzmüller (TU Wien)</i>
17:45 – 18:10	Real-world Objects and Virtual Objects Management in Cognitive Internet of Things <i>A. Somov (Uni Moskau)</i>
ab 18:30	Abendessen

Dienstag 22.09.2026 (GMA-FA 2.14)

08:00 – 09:00	Intelligentes Auslösen statt starres Abtasten: Ereignisbasierte Regelung im Spannungsfeld zwischen Regelgüte und Ressourcenverbrauch <i>F. Allgöwer (Uni Stuttgart)</i>
09:00 – 09:25	Asynchrone sensitivitätsbasierte verteilte modellprädiktive Regelung <i>M. Pierer von Esch, K. Graichen (FAU Erlangen)</i>
09:25 – 09:50	Zu Optimalität und Entwurf mit der Sontagschen Reglerformel <i>B. Lohmann, J. Bongard (TUM)</i>
09:50 – 10:20	Kaffeepause
10:20 – 10:55	A Small Gain Theorem for Well-Defined but Not-Necessarily Well-Posed LTI Systems <i>J. Kowalewski (Siemens Energy Erlangen), Th. Moor (FAU Erlangen)</i>
10:55 – 11:10	Aussprache des GMA-FA 2.14 <i>J. Deutscher (Uni Ulm)</i>
12:00	Lunchpaket
12:10	Ausflug
ab 19:00	Abendessen

Mittwoch 23.09.2026 (GAMM-FA/GMA-FA 2.13)

08:30 – 08:45	Begrüßung der Teilnehmer des GAMM-FA
08:45 – 09:20	An RKHS perspective on algebraic estimator analysis and design <i>M. Noack, T. Faulwasser (TU Hamburg)</i>
09:20 – 09:45	Fundamental limitations of digital control <i>S. Lang, F. Allgöwer (Uni Stuttgart)</i>
09:45 – 10:20	Koopman operator theory: fundamentals and data-driven approximation <i>K. Worthmann (TU Ilmenau)</i>
10:20 – 10:50	Kaffeepause
10:50 – 11:25	Stability of MPC based on data-driven input/output models <i>L. Bold (TU Ilmenau), I. Schimperna (Uni Pavia), K. Worthmann (TU Ilmenau), J. Köhler (Imperial College London)</i>
11:25 – 12:00	Systematic Design of Stabilizing Model Predictive Controllers for Nonholonomic Systems <i>E. Krendelsberger (TU Ilmenau), J. Krauspenhaar (Uni Stuttgart), L. Bold (TU Ilmenau), M. Rosenfelder, P. Eberhard (Uni Stuttgart), H. Ebel (TU Lappeenranta), K. Worthmann (TU Ilmenau)</i>
12:00 – 14:00	Mittagessen
14:00 – 14:25	Data-driven Dynamic Modeling of Soft Robots for Agile Trajectory Tracking <i>M. Grube, C. Duske, R. Seifried (TU Hamburg)</i>
14:25 – 14:50	Experimentelle Untersuchungen einer modellprädiktiven Regelung mit symplektischer Diskretisierung an einem Zweipendelsystem <i>M. Klein, A. Othmane, K. Fläßkamp (Uni des Saarlandes)</i>
14:50 – 15:15	Predictor-Based Extremum Seeking for Optimal Wake Steering in Wind Farms <i>A. Othmane (Uni des Saarlandes), D. Bresch-Pietri (Mines Paris)</i>
15:15 – 15:40	Analysis and Model Predictive Control of Mechanical Multibody Systems Subject to Non-Integrable Acceleration-Level Constraints <i>M. Rosenfelder, J. Krauspenhaar, E. Krendelsberger, L. Bold, K. Worthmann (TU Ilmenau), H. Ebel (TU Lappeenranta), P. Eberhard (Uni Stuttgart)</i>
15:40 – 16:15	Turnpike properties in nonlinear system identification <i>J. Schiller, M. Müller (Uni Hannover)</i>
16:15 – 17:10	Aussprache des GAMM-FA
17:10 – 17:40	Kaffeepause
17:40 – 17:50	Begrüßung der Teilnehmer des GMA-FA 2.13 <i>J. Saak (MPI Magdeburg), J. Fehr (Uni Stuttgart)</i>
17:50 – 18:50	Reduced-order Modeling in the Age of AI <i>P. Benner (MPI Magdeburg)</i>
ab 19:00	Abendessen

Donnerstag 24.09.2026 (GMA-FA 2.13)

08:30 – 08:55	Parameteridentifikation Q(U)- geregelter Energieerzeugungsanlagen am Modell eines umrichtergekoppelten Windparks zur Erkennung von Fehlparametrierungen <i>L. Neumann, S. Krahmer, K. Röbenack (TU Dresden)</i>
08:55 – 09:20	Comparing Residual and Full Data-Driven Inverse Dynamics Models for an Industrial Delta Robot <i>P. Kaiser, J. Gesell (Uni Stuttgart), D. Pfeifer (ISG Stuttgart), J. Fehr (Uni Stuttgart)</i>
09:20 – 09:45	Autonomous Iterative Learning Control for Systems with Unknown Dynamics <i>T. Seel, J.-H. Ewering, S. Ehlers, M. Meindl (Uni Hannover)</i>
09:45 – 10:15	Kaffeepause
10:15 – 10:40	Daten- und modellbasierte Schätzung nicht messbarer Größen in der Fahrzeugtechnik an drei Beispielen <i>S. Ehlers, H. Schäfke, D. Bank, B. Volkmann, T. Seel (Uni Hannover)</i>
10:40 – 11:05	Modellierung und Identifikation der Karbonatisierung eines thermochemischen Speichers mit CO ₂ -Abscheidung <i>E. Röhm (Uni Stuttgart), E. Klockow, M. Linder (DLR Stuttgart), O. Sawodny (Uni Stuttgart)</i>
11:05 – 11:30	Ein universelles Modell zur Vorhersage der Filtrationsleistung von fasrigen Gasfiltermedien <i>T. Ertl (Uni Stuttgart)</i>
11:30 – 11:55	Modellierung der Rauheitsübertragung beim Dressierwalzen von verzinkten Stahlbändern mittels Verteilungsdichten der Oberflächenhöhen <i>N. Fischer, A. Steinböck (TU Wien)</i>
12:00	Mittagessen
nachmittags	Ausflug
ab 19:00	Abendessen

Freitag 25.09.2026 (GMA-FA 2.13)

08:30 – 09:05	Port-Hamiltonian Modeling of a Synchronous Reluctance Machine for Structure-Preserving Model Reduction <i>J. Rettberg, J. Fehr, N. Lüer (Uni Stuttgart)</i>
09:05 – 09:30	Datengetriebene iterative Methode zur Modellreduktion bilinearer Systeme <i>J. Lilienblum, I. V. Gosea, P. Benner (MPI Magdeburg)</i>
09:30 – 09:55	Datengetriebene Modellierung und Schätzung der Strahlpositionsdrift in Elektronenstrahlsystemen <i>K. Schrom, A. Deutschmann-Olek, A. Kugi (TU Wien)</i>
09:55 – 10:25	Kaffeepause
10:25 – 10:50	Posenschätzung für ein supraleiterbasiertes Schwebemodul <i>F. Geuss, O. Sawodny (Uni Stuttgart)</i>
10:50 – 11:15	Adaptive Parameter Tuning of PID Controllers using Structured H_∞ -Synthesis <i>P. Breitschwerdt, J. Gesell, D. Leprich, J. Fehr (Uni Stuttgart)</i>
11:15 – 11:50	Maschinelles Lernen dynamischer Systeme aus Observablen <i>K. Janik (MPI Magdeburg), A. Othmane (Uni des Saarlandes), S. Yildiz, P. Benner (MPI Magdeburg)</i>
11:50 – 12:10	Aussprache des GMA-FA 2.13 <i>J. Saak (MPI Magdeburg), J. Fehr (Uni Stuttgart)</i>
12:10	Mittagessen

Teilnehmerliste

Daniela Aguirre Salazar

TU Darmstadt

Fachgebiet Regelungsmethoden und Intelligente Systeme

daniela.aguirre@tu-darmstadt.de

Prof. Frank Allgöwer

Universität Stuttgart

Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik

frank.allgower@ist.uni-stuttgart.de

Prof. Peter Benner

Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme Magdeburg

Computational Methods in Systems and Control Theory

benner@mpi-magdeburg.mpg.de

Lea Bold

TU Ilmenau

Optimization-based Control

lea.bold@tu-ilmenau.de

Philipp Breitschwerdt

Universität Stuttgart

Institut für Technische und Numerische Mechanik

pbreitschwerdt@icloud.com

Prof. Joachim Deutscher

Universität Ulm

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik

joachim.deutscher@uni-ulm.de

Assistant Prof. Andreas Deutschmann-Olek

TU Wien

Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik

deutschmann@acin.tuwien.ac.at

Dr. Philip Dorpmüller

Diehl Defence GmbH & Co. KG

Simulationsentwicklung

philip.dorpmueller@diehl-defence.com

Dr. Simon Ehlers

Leibniz Universität Hannover

Institut für Mechatronische Systeme

simon.ehlers@imes.uni-hannover.de

Sebastian Eming

Karlsruher Institut für Technologie
Digital Process Engineering
mq4284@kit.edu

Tobias Ertl

Universität Stuttgart
Institut für Technische und Numerische Mechanik
tobi.ertl@t-online.de

Prof. Jörg Fehr

Universität Stuttgart
Institut für Technische und Numerische Mechanik
Joerg.fehr@itm.uni-stuttgart.de

Nico Fischer

TU Wien
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik
fischer@acin.tuwien.ac.at

Prof. Kathrin Flaßkamp

Universität des Saarlandes
Modellierung und Simulation technischer Systeme
kathrin.flaskamp@uni-saarland.de

Prof. Nicole Gehring

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik
nicole.gehring@ovgu.de

Ferdinand Geuß

Universität Stuttgart
Institut für Systemdynamik
ferdinand.geuss@isys.uni-stuttgart.de

Prof. Knut Graichen

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

Linus Groß

TU Darmstadt
Fachgebiet Regelungsmethoden und Intelligente Systeme
linus.gross@tu-darmstadt.de

Dr. Malte Grube

Hamburg University of Technology
Institute of Mechanics and Ocean Engineering
malte.grube@tuhh.de

Georg Hartl

Johannes Kepler Universität Linz
Institut für Regelungstechnik
georg.hartl@jku.at

Prof. Claus Hillermeier

Universität der Bundeswehr München
Professur für Automatisierungs- und Regelungstechnik
Claus.Hillermeier@unibw.de

Dr. Peter Hippe

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Regelungstechnik
peter.hippe@fau.de

Oussama Jabri

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik
oussama.jabri@ovgu.de

Konrad Janik

Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme Magdeburg
Numerische Methoden in der System- und Regelungstheorie
janik@mpi-magdeburg.mpg.de

Lars Jose

Universität des Saarlandes
Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik
lars.jose@uni-saarland.de

Cédric Jung

TU Wien
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik
jung@acin.tuwien.ac.at

Philipp Kaiser

Universität Stuttgart
Institut für Technische und Numerische Mechanik
philipp.rodegast@itm.uni-stuttgart.de

Dr. Kai Karvinen

Carl Zeiss SMT GmbH
Department Actuators, Sensors, Dynamics & Control
kai.karvinen@zeiss.com

Prof. Wolfgang Kemmetmüller

TU Wien
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik
kemmetmueller@acin.tuwien.ac.at

Miguel Klein

Universität des Saarlandes
Modellierung und Simulation technischer Systeme
mikl00006@uni-saarland.de

Anna Klyushina

TU Darmstadt
Fachgebiet Regelungsmethoden und Intelligente Systeme
anna.klyushina@tu-darmstadt.de

Julia Kowalewski

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Regelungstechnik
julia.kowalewski@fau.de

Emilia Krendelsberger

TU Ilmenau
Optimization-based control
emilia.krendelsberger@tu-ilmenau.de

Simon Lang

University of Stuttgart
Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik
simon.lang@ist.uni-stuttgart.de

Jan Lilienblum

Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme Magdeburg
Computational Methods in Systems and Control Theory
lilienblum@mpi-magdeburg.mpg.de

Prof. Boris Lohmann

TU München
Lehrstuhl für Regelungstechnik
Lohmann@tum.de

Torben Niklas Lundt
Universität Hohenheim
Prozessanalytik
torben.lundt@uni-hohenheim.de

Nick Math
Universität Ulm
Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
nick.math@uni-ulm.de

Dr. Konrad Meister
MANN+HUMMEL
konrad.meister@mann-hummel.com

Prof. Thomas Moor
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Regelungstechnik
thomas.moor@fau.de

Lukas Neumann
TU Dresden
Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie
lukas.neumann@tu-dresden.de

Dr. Matti Noack
TU Hamburg
Institute of Control Systems
matti.noack@tuhh.de

Prof. Pavel Osinenko
Zentrale Universität Moskau
AI in Dynamic Action Lab
p.osinenko@gmail.com

Dr. Amine Othmane
Universität des Saarlandes
Modellierung und Simulation technischer Systeme
amine.othmane@uni-saarland.de

Dr. Maximilian Pierer von Esch
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Regelungstechnik
maximilian.v.pierer@fau.de

Dr. Maximilian Raff

Universität Stuttgart
Institut für Adaptive Mechanische Systeme
raff@iams.uni-stuttgart.de

Prof. Johannes Reuter

Hochschule Konstanz
Institut für Systemdynamik
jreuter@htwg-konstanz.de

Mario Rosenfelder

Universität Stuttgart
Institut für Technische und Numerische Mechanik
mario.rosenfelder@itm.uni-stuttgart.de

Finn Ruchti

Universität Ulm
Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
finn.ruchti@uni-ulm.de

Prof. Joachim Rudolph

Universität des Saarlandes
Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik
j.rudolph@lsr.uni-saarland.de

Prof. Klaus Röbenack

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

Emil Röhm

Universität Stuttgart
Institut für Systemdynamik
emil.roehm@isys.uni-stuttgart.de

Dr. Jens Saak

Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme Magdeburg
Computational Methods in Systems and Control Theory
saak@mpi-magdeburg.mpg.de

Prof. Manuel Schaller

Chemnitz University of Technology
Numerische Mathematik
manuel.schaller@math.tu-chemnitz.de

Dr. Julian Schiller

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

Prof. Kurt Schlacher

Johannes Kepler Universität Linz
Institut für Regelungstechnik
kurt.schlacher@jku.at

Dr. Tessina Scholl

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Automation und angewandte Informatik
tessina.scholl@kit.edu

Katharina Schrom

TU Wien
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik
katharina.schrom@tuwien.ac.at

Prof. Markus Schöberl

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

Prof. Thomas Seel

Leibniz Universität Hannover
Institut für Mechatronische Systeme
thomas.seel@imes.uni-hannover.de

Prof. Robert Seifried

TU Hamburg
Institut für Mechanik und Meerestechnik
robert.seifried@tuhh.de

Prof. Andrey Somov

Zentrale Universität Moskau
Intelligent Sensing Systems Lab
a.somov@centraluniversity.ru

Prof. Rick Voßwinkel

Westsächsische Hochschule Zwickau
Automatisiertes Fahren und Fahrerassistenzsysteme
rick.vosswinkel@whz.de

Lucas Wey Hacker

TU Darmstadt

Regelungstechnik und Intelligente Systeme

lucas.hacker@tu-darmstadt.de

Prof. Frank Woittennek

UNIT TIROL

Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik

frank.woittennek@unit-tirol.at

Prof. Karl Worthmann

TU Ilmenau

Optimization-based Control Group

karl.worthmann@tu-ilmenau.de

Dr. Jens Wurm

UNIT TIROL

Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik

jens.wurm@unit-tirol.at

Julian Zimmer

Universität Ulm

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik

julian.zimmer@uni-ulm.de

Prof. Alexander Zuyev

Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme Magdeburg

Computational Methods in Systems and Control Theory

zuyev@mpi-magdeburg.mpg.de

Reglerentwurf für asymptotische Störkompensation – Der allgemeine Fall

P. Hippe†

†Lehrstuhl für Regelungstechnik, Cauerstr. 7, 91058 Erlangen, E-Mail: Peter.Hippe@fau.de

Beim klassischen Entwurf von Reglern zur asymptotischen Störkompensation erweitert man die Strecke um die Signalmodelle und bestimmt eine Zustandsrückführung so, dass die Eigenwerte der erweiterten Strecke gewünschte Lagen einnehmen. Da die Zustände der Signalmodelle messbar sind, benötigt man lediglich einen Zustandsbeobachter für die Strecke. Bei begrenzter Stellenergie ist Windup-Vermeidung erforderlich, was am einfachsten durch Ansteuerung des Beobachters mit dem begrenzten Stellsignal geschieht. Dadurch wird der Regler im Begrenzungsfall stabilisiert, nicht jedoch der klassisch entworfene Regler mit internem Störmodell. Durch modifizierte Ansätze lässt sich diese Problematik beseitigen. Die meisten dieser Ansätze sind aber auf bestimmte Beobachterordnungen oder bestimmte Streckentypen beschränkt (z.B. quadratische Systeme). Hier wird eine neue Vorgehensweise zum Entwurf solcher Regler präsentiert, die bei quadratischen oder nichtquadratischen Systemen und beliebigen Beobachterordnungen anwendbar ist. Nachdem man eine stabilisierende Zustandsrückführung für die nicht erweiterte Strecke bestimmt hat entwirft man einen Beobachter für die modellierten Störsignale, wofür man auf Ergebnisse in [1] zurückgreifen kann. Dann parametrisiert man den beobachterbasierten Zustandsregler für die Strecke, wobei Einheitsbeobachter, reduzierte Beobachter oder auch Beobachter für lineare Funktionale verwendet werden können. Durch Zusammenfassung des Beobachters für die Störmodelle mit dem Zustandsbeobachter entsteht direkt der Zustands-plus-Störbeobachter. Steuert man diesen Beobachter mit dem begrenzten Stellsignal an, ist der so genannte Regler-Windup systematisch beseitigt, und die möglicherweise verbleibenden nichtlinearen Effekte (der so genannte Strecken-Windup) sind dieselben, als wenn eine konstante Rückführung messbarer Streckenzustände vorläge.

Literatur

- [1] Hippe, P.; Deutscher, J.: Design of Observer-based Compensators – From the Time to the Frequency Domain, Springer, London 2009.

Legendre-Tau als Zustandsraumrealisierung für Padé-Approximationen von Totzeitsystemen

T. H. Scholl, L. Gröll

Institut für Automation und angewandte Informatik (IAI), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Tel: +49 721 608-25807, E-Mail: {tessina.scholl, lutz.groell}@kit.edu

Tritt eine Totzeit $h > 0$ in einem geregelten System auf, führt die Beschreibung des geschlossenen Regelkreises im Zeitbereich üblicherweise auf eine retardierte Funktionaldifferentialgleichung der Form $\dot{x}(t) = f(x(t), x(t-h))$. Weist die rechte Seite Nichtlinearitäten oder Unsicherheiten auf, kann eine Darstellung als

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + A_1 x(t-h) + B a(C_0 x(t) + C_1 x(t-h)) \quad (1)$$

mit einer nichtlinearen oder unsicherheitsbehafteten Abbildung $a: \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^m$ hilfreich sein, wobei $A_0, A_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C_0, C_1 \in \mathbb{R}^{p \times n}$. Dementsprechend sind LTI-Systeme mit Totzeit in der Zustands- und Ausgangsgleichung

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + A_1 x(t-h) + B u(t) \quad (2a)$$

$$y(t) = C_0 x(t) + C_1 x(t-h) \quad (2b)$$

relevant, die mit einer nichtlinearen oder unsicherheitsbehafteten Abhängigkeit $u = a(y)$ kombiniert werden können, um (1) darzustellen. In diesem Kontext von Lur'e-Systemen und Robustheitsbetrachtungen, etwa im Rahmen absoluter Stabilität oder, allgemeiner, integraler quadratischer Bedingungen (IQCs), spielt der Frequenzgang $G(i\omega)$ des linearen Nominalsystems (2) eine entscheidende Rolle.

Zur einfacheren Handhabung der Übertragungsfunktion

$$G(s) = (C_0 + C_1 e^{-sh})(sI_n - A_0 - A_1 e^{-sh})^{-1} B \quad (3)$$

wird in regelungstechnischen Lehrbüchern üblicherweise die rationale Approximation mittels Allpass-Padé-Approximation der enthaltenen Exponentialterme behandelt [6, 4]. Die weitreichende Theorie, siehe z.B. [2], ist in der Praxis jedoch dadurch eingeschränkt, dass bei Standardimplementierungen aufgrund numerischer Probleme von höheren Ordnungen abgeraten wird [4, 11].

Der Beitrag zeigt, dass die Legendre-Tau-Diskretisierung von (2) unmittelbar eine Zustandsraumrealisierung dieser Padé-basierten Approximation der Übertragungsfunktion darstellt. In Bezug auf die charakteristische Gleichung finden sich verwandte Ergebnisse in [3, 1]. Ein Äquivalenzresultat für die Übertragungsfunktion wurde unabhängig von [7] in [5] mit einem anderen methodischen Zugang hergeleitet, berücksichtigt jedoch nicht die für die oben genannte Anwendung wichtige Totzeit in der Ausgangsgleichung.

Das Legendre-Tau-LTI-System kann auch für hohe Approximationsordnungen mit geringem Implementierungsaufwand aufgestellt werden [10]. Zudem besteht ein direkter Bezug zur operatorwertigen Dynamikbeschreibung des funktionswertigen Zustands $x_t(\theta) = x(t+\theta)$, $\theta \in [-h, 0]$ von (2) [9]. Dieser Bezug ist in der genannten Anwendung besonders relevant, wenn der Kalman-Yakubovich-Popov (KYP)-basierte Zusammenhang zwischen Frequenzbereichsmethoden und Lyapunov-basierter Analyse im Zeitbereich genutzt werden soll [8].

Literatur

- [1] Mathieu Bajodek, Frédéric Gouaisbaut und Alexandre Seuret. Frequency delay–dependent stability criterion for time–delay systems thanks to Fourier–Legendre remainders. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 31(12):5813–5831, 2021.
- [2] K. Glover, J. Lam und J. R. Partington. Rational approximation of a class of infinite-dimensional systems II: Optimal convergence rates of L_∞ approximants. *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 4(3):233–246, 1991.
- [3] K. Ito. Legendre-tau approximation for functional differential equations part III: Eigenvalue approximations and uniform stability. In: Franz Kappel, Karl Kunisch und Wilhelm Schappacher (Edits.), *Distributed Parameter Systems*, S. 191–212, Berlin, 1985. Springer.
- [4] J. Lunze. *Regelungstechnik 1*. Springer, Berlin, 2020.
- [5] Evert Provoost und Wim Michiels. The Lanczos tau framework for time-delay systems: Padé approximation and collocation revisited. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 62(6):2529–2548, 2024.
- [6] K. Reinschke. *Lineare Regelungs- und Steuerungstheorie*. Springer, Berlin, 2006.
- [7] Tessina H. Scholl. *Stability in time-delay systems*. Dissertation, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, 2024.
- [8] Tessina H. Scholl. Lyapunov-Krasovskii functionals of robust type for the stability analysis in time-delay systems. *arXiv:2312.16738v3*, 2026.
- [9] Tessina H. Scholl und Lutz Gröll. From matrices to operators: A tensorial view on the Legendre tau method for time-delay systems. *IFAC-PapersOnLine*, 59(13):99–104, 2025. 19th IFAC Workshop on Time Delay Systems TDS 2025.
- [10] Tessina H. Scholl, Veit Hagenmeyer und Lutz Gröll. What ODE-approximation schemes of time-delay systems reveal about Lyapunov–Krasovskii functionals. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 69(7):4614–4629, 2024.
- [11] The MathWorks, Inc. *Control System Toolbox Reference*. Natick, MA, 2026.

Regelung einer Klasse nichtlinearer Konvektions-Reaktions-Systeme mit Speichereffekten und relativem Grad Eins

Jens Wurm, Frank Woittennek

Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, UMIT TIROL,
Eduard-Wallnöfer-Zentrum 1, Hall in Tirol, Österreich
Tel: +43(0)50/86483977,
E-Mail: {jens.wurm,frank.woittennek}@umit-tirol.at

Betrachtet werden eindimensionale verteilt-parametrische Systeme,

$$\begin{aligned}\partial_t \zeta(z, t) + \Lambda \partial \zeta(z, t) &= f(\zeta(z, t), \eta(z, t)), & \zeta(z, t) &\in \mathbb{R}^n \\ \partial_t \eta(z, t) &= g(\zeta(z, t), \eta(z, t)), & \eta(z, t) &\in \mathbb{R}\end{aligned}$$

die aus mehreren nichtlinearen Konvektions-Reaktions-Gleichungen bestehen, welche verteilt mit einer nichtlinearen Reaktionsgleichung gekoppelt sind. Derartige Modelle eignen sich beispielsweise zur Beschreibung thermischer Rohrströmungen, von Entsalzungsanlagen oder des kinetischen Verhaltens von Katalysatoren.

In typischen Anwendungen ist der Ausgang eines der Konvektions-Reaktions-Teilsysteme zwischen stationären Arbeitspunkten zu überführen, wobei eine Zuflussgröße als Stellgröße fungiert; die verbleibenden Größen werden als bekannte Störgrößen angenommen. Zur Lösung des resultierenden Steuerungsproblems wird ein inversionsbasierter Ansatz vorgestellt.

Durch die Projektion entlang der gemeinsamen Charakteristiken folgt ein semi-explizites System von partielle Differential-algebraischen Gleichung (pDagl), dass sich auf eine einzige gewöhnliche Differentialgleichung (gDgl) mit örtlich verteilten Zustand reduzieren lässt. Diese Gleichung bildet die Grundlage des Steuerungsentwurfs und verallgemeinert sowie erweitert den in [1] vorgestellten Ansatz. Die Eigenschaften dieser Gleichung hängen von der Kopplungsstruktur des ursprünglichen Konvektions-Reaktions-Systems ab. Während der Ausgang in den meisten Fällen relativen Grad Null aufweist, ist für praktische Anwendungen insbesondere der relative Grad Eins von Interesse.

Neben dem Steuerungsentwurf, der bekannte Störgrößen berücksichtigt, lässt sich zudem ein Regelungskonzept zur Ausgangsführung ableiten. Für das ursprüngliche, auf den Charakteristiken formulierte Modell führt dieses Konzept zu einer prädiktorbasierten Rückführung. Die Lösungseigenschaften werden sowohl aus analytischer als auch aus numerischer Sicht diskutiert.

Literatur

- [1] J. Wurm und F. Woittennek, „Control design for convection-reaction systems with storage effects and positive relative degree“, PAMM, 2024, doi: 10.1002/pamm.202400161.

Nichtlineare Backstepping-Regelung semilinearer parabolischer Systeme

J. Deutscher, F. Ruchti

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm,
E-Mail: {joachim.deutscher,finn.ruchti}@uni-ulm.de

In den vergangenen zwei Jahrzehnten hat sich der *Backstepping-Ansatz* als vielseitiges Werkzeug zur Regelung von linearen verteilt-parametrischen Systemen (SVP) weitestgehend etabliert (siehe [5] für einen aktuellen Überblick). Bei vielen Anwendungen muss für eine hinreichend genaue Modellbildung jedoch der nichtlineare Charakter des SVP berücksichtigt werden, ohne dabei auf eine Betriebspunktlinearisierung zurückzugreifen. Dies ist beispielsweise bei der Regelung von fluiddynamischen Systemen, flexiblen Strukturen sowie bei thermischen oder chemischen Systemen relevant.

Für nichtlineare endlich-dimensionale Systeme ist die *exakte Zustandslinearisierung* ein grundlegender Ansatz zur Stabilisierung der Ruhelage des Regelkreises. Durch eine nichtlineare Zustandstransformation wird das nichtlineare System auf eine Form gebracht, welche die Kompensation aller Nichtlinearitäten erlaubt (siehe [2]). Dies ermöglicht eine einfache Vorgabe der Abklingrate für die lokale exponentielle Konvergenz der Lösung gegen die Ruhelage. Es ist naheliegend dieses Entwurfsverfahren auch auf nichtlineare SVP zu verallgemeinern. Ein allgemeiner Backstepping-basierter Ansatz zur exakten Zustandslinearisierung für eine große Klasse semilinearer parabolischer PDEs mit *Volterra-Nichtlinearitäten* wird in [6, 7] vorgestellt (siehe [4] für eine aktuelle Erweiterung auf nichtlineare hyperbolische Systeme). Dabei erfolgt die Bestimmung eines nichtlinearen Volterra-Reihenoperators durch Lösung einer unendlichen Anzahl kaskadierter linearer Kerngleichungen, um das semilineare parabolische System auf ein lineares Zielsystem zu transformieren. Die inhärente Komplexität dieser Methode schränkt deren Anwendbarkeit jedoch wesentlich ein. Kürzlich wurde in [1] ein neuartiger *flachheitsbasierter Ansatz* zur Rückführungslinearisierung semilinearer parabolischer Systeme vorgeschlagen. Dieses Verfahren führt den Entwurf auf die Online-Lösung eines linearen zustandsabhängigen Cauchy-Problems zurück und erzielt eine asymptotische Stabilisierung der Ruhelage des Regelkreises.

In diesem Vortrag wird ein neuer Zugang zur nichtlinearen Backstepping-Regelung semilinearer parabolischer Systeme vorgestellt. Dazu wird der nichtlineare Reaktionsterm in eine formal lineare Form mit einem zustandsabhängigen Koeffizienten umgeschrieben. Dies ermöglicht die direkte Anwendung klassischer Ergebnisse des linearen Backstepping-Entwurfs *ohne* Approximation des Systems, um die nichtlineare Backstepping-Transformation und die zugehörige nichtlineare Zustandsrückführung für die Transformation auf ein lineares parabolisches Zielsystem zu bestimmen. Die resultierenden zustandsabhängigen Kerngleichungen lassen sich mit dem in [3] vorgestellten Verfahren systematisch online lösen. Dazu wird durch eine örtliche Diskretisierung der Kern-Integralgleichung eine lineare zeitvariante *Kern-ODE* für die örtlichen Abtastwerte des Kerns hergeleitet. Da deren Ordnung quadratisch mit der Anzahl der Abtastpunkte wächst, erfolgt die Vorstellung eines alternativen numerischen Implementierungsschemas für den Backstepping-Regler. Dieses basiert auf einer *Polynomapproximation* des Kerns mit zeitabhängigen Koeffizienten, welche sich aus einer Differentialrekursion ergeben. Zu deren Lösung wird ein systematisches Verfahren vorgestellt, mit dem sich das Kern-Polynom für beliebige Grade eindeutig bestimmen lässt. Die Genauigkeit der resultierenden Polynomapproximation

kann sehr effizient anhand einer hochgenauen online-Bestimmung des Kerns systematisch verifiziert werden. Da der Kern in Form eines symbolischen Ausdrucks vorliegt, lässt er sich zur Laufzeit einfach auswerten. Dazu müssen allerdings die Koeffizienten des Reihenentwicklung des Streckenzustands bekannt sein, welche sich effizient mittels eines Koeffizientenmodells niedriger Ordnung zur Laufzeit bestimmen lassen. Der neue nichtlineare Backstepping-Reglerentwurf wird anhand eines semilinearen parabolischen Systems mit quadratischem Reaktionsterm in Simulationen validiert.

- [1] IRSCHIED, A. ; GEHRING, N. ; DEUTSCHER, J. ; RUDOLPH, J.: A new approach to boundary control of semilinear parabolic PDEs that yields linear tracking error dynamics. In: *Angenommen für EJC* (2026)
- [2] ISIDORI, A.: *Nonlinear Control Systems*. London : Springer-Verlag, 1995
- [3] JADACHOWSKI, L. ; MEURER, Th. ; KUGI, A.: An efficient implementation of backstepping observers for time-varying parabolic PDEs. In: *IFAC Proc. Vol. 45* (2012), S. 798–803. – 7th Vienna Int. Conf. Math. Mod.
- [4] KRSTIC, M.: Feedback linearization of hyperbolic PDEs with Volterra nonlinearities. (2026). <https://arxiv.org/abs/2604.27400>
- [5] VAZQUEZ, R. ; AURIOL, J. ; BRIBIESCA-ARGOMEDO, F. ; KRSTIC, M.: Backstepping for partial differential equations: A survey. In: *Automatica* 183 (2026). – Art. no. 112572
- [6] VAZQUEZ, R. ; KRSTIC, M.: Control of 1-D parabolic PDEs with Volterra nonlinearities, Part I: Design. In: *Automatica* 44 (2008), S. 2778–2790
- [7] VAZQUEZ, R. ; KRSTIC, M.: Control of 1-D parabolic PDEs with Volterra nonlinearities, Part II: Analysis. In: *Automatica* 44 (2008), S. 2791–2803

Backstepping und die strenge Rückkopplungsform hyperbolischer verteilt-parametrischer Systeme

N. Gehring

Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg, E-Mail: nicole.gehring@ovgu.de

Der Backstepping-Entwurf von Reglern für Systeme mit verteilten Parametern (SVP) nutzt typischerweise eine Volterra-Integraltransformation, um eine gegebene Dynamik auf eine Zieldynamik abzubilden, in der die Wahl einer stabilisierenden Zustandsrückführung naheliegt (z.B. [5]). Seinen Ursprung hat dieser Entwurf in [2]. Dort wird der für endlichdimensionale Systeme in strenger Rückkopplungsform bekannte sukzessive Backstepping-Entwurf auf eine Reaktions-Diffusions-Gleichung übertragen, die nach einer örtlichen Semidiskretisierung ebenfalls in strenger Rückkopplungsform vorliegt. Die Backstepping-Entwürfe für parabolische SVP und endlichdimensionale Systeme verbindet außerdem, dass die verwendeten Transformationen aufgrund ihrer triangulären Struktur inhärent invertierbar sind.

Für heterodirektionale hyperbolische Systeme, wie sie beispielsweise Wellenphänomene beschreiben, werden in der Backstepping-Literatur unterschiedliche Transformationen und Zielsysteme diskutiert (z.B. [1], [4]). Im Gegensatz zum parabolischen Fall führt die räumliche Diskretisierung eines hyperbolischen SVP jedoch nicht auf ein endlichdimensionales System in strenger Rückkopplungsform. Zudem weist die räumliche Diskretisierung der Volterra-Integraltransformation keine trianguläre Struktur auf.

Diesen strukturellen Unterschied zwischen hyperbolischen und parabolischen Systemen greift der Vortrag auf (siehe auch [3]). Er bietet eine alternative Interpretation der etablierten Backstepping-Entwürfe aus systemtheoretischer Sicht. Durch die Kombination und Erweiterung bestehender Backstepping-Ergebnisse wird eine strenge Rückkopplungsform für heterodirektionale hyperbolische SVP hergeleitet. Auf diese Weise wird die Verbindung zwischen Backstepping für SVP und seinem endlichdimensionalen Ursprung sichtbar. Die daraus gewonnenen strukturellen Einsichten zeigen Zusammenhänge mit den Eigenschaften der exakten Steuerbarkeit und der Flachheit auf und ermöglichen die Übertragung bekannter Konzepte aus dem endlichdimensionalen auf den unendlichdimensionalen Fall.

- [1] J. Auriol und F. Di Meglio. Minimum time control of heterodirectional linear coupled hyperbolic PDEs. *Automatica*, 71:300–307, 2016.
- [2] A. Balogh und M. Krstic. Infinite dimensional backstepping-style feedback transformations for a heat equation with an arbitrary level of instability. *Eur. J. Contr.*, 8(2):165–175, 2002.
- [3] N. Gehring. On the strict-feedback form of hyperbolic distributed-parameter systems. In: *Proc. European Control Conference (ECC), Reykjavik, Iceland*, S. 238–243, 2026.
- [4] L. Hu, R. Vazquez, F. Di Meglio und M. Krstic. Boundary exponential stabilization of 1-D inhomogeneous quasilinear hyperbolic systems. *SIAM J. Contr. Optim.*, 57:963–998, 2019.
- [5] M. Krstic und A. Smyshlyaev. *Boundary Control of PDEs: A Course on Backstepping Designs*. SIAM Philadelphia, 2008.

On Periodic Trajectories of Boundary-Controlled Nonlinear Euler Equations

Alexander Zuyev, Peter Benner

Max Planck Institute for Dynamics of Complex Technical Systems, Sandtorstraße 1, 39106 Magdeburg, Tel: ++49(0)391/6110450, E-Mail: {zuyev,benner}@mpi-magdeburg.mpg.de

A mathematical model of gas flow in a pipeline controlled by the inlet pressure and the outlet mass flow flux is considered in the form of the isothermal Euler equations with an appropriate equation of state. Within the framework of boundary control systems, this model is transformed into a nonlinear abstract differential equation using an appropriate lifting operator. For this abstract equation, a representation in terms of Fourier coefficients is derived analytically. Conditions for the existence of periodic solutions to a broad class of nonlinear control systems with continuously differentiable controls are established in abstract spaces. This framework is applied to a realistic hydrogen transport model to evaluate periodic operating regimes under periodic fluctuations in supply and demand. This talk is based on [1].

The authors gratefully acknowledge the funding by the European Regional Development Fund (ERDF) within the programme Research and Innovation — Grant Number ZS/2023/12/182138.

Literatur

- [1] Zuyev, A.; Benner, P.: Boundary control and periodic trajectories of semilinear Euler equations with application to hydrogen transport, arXiv preprint arXiv:2607.20948, 2026.

Datengetriebener Beobachterentwurf auf Basis von Mixture Density Networks für Systeme mit ununterscheidbaren Trajektorien

Sebastian Mathis Eming, Pascal Jerono, Thomas Meurer

Digital Process Engineering Group, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Engler-Bunte-Ring 1b 76131 Karlsruhe, E-Mail: {sebastian.eming, pascal.jerono, thomas.meurer}@kit.edu

Datengetriebene und auf maschinellem Lernen basierende Verfahren haben zunehmend an Bedeutung für den Beobachterentwurf gewonnen [1]. Solche Ansätze können genutzt werden, um datengetriebene Repräsentationen der Systemdynamik zu erstellen und diese mit etablierten Schätzverfahren wie Kalman-Filtern oder Moving-Horizon-Schätzern zu kombinieren. Alternativ kann die Zustandsrekonstruktion direkt aus Messdaten erlernt werden. Letzteres stellt einen attraktiven Black-Box-Ansatz dar, da die Zustandsrekonstruktion direkt als Abbildung von der verfügbaren Messinformation auf den Systemzustand erlernt werden kann, ohne dass eine explizite modellbasierte Beobachterstruktur erforderlich ist. Der Verzicht auf ein explizites mathematisches Modell schränkt jedoch den direkten Zugang zu strukturellen Systemeigenschaften wie Beobachtbarkeit, Detektierbarkeit und Ununterscheidbarkeit ein. Daraus ergibt sich die Frage, wie Mehrdeutigkeiten bei der Zustandsrekonstruktion in einem rein datengetriebenen Beobachter behandelt werden können.

In diesem Beitrag wird ein rein datengetriebener Beobachter für Systeme mit einer endlichen Anzahl ununterscheidbarer Trajektorien betrachtet, bei denen eine Ausgangstrajektorie mehreren unterschiedlichen Zustandstrajektorien entsprechen kann [2]. Konventionelle deterministische Regressionsmodelle mit Punktschätzung können diese Mehrdeutigkeit nicht explizit abbilden. Zur Behandlung dieses Problems wird daher ein rein datengetriebener Beobachter auf Basis eines Mixture Density Networks (MDN) vorgeschlagen [3]. Durch die Vorhersage einer bedingten multimodalen Zustandsverteilung kann ein MDN mehrere Zustände repräsentieren, die mit derselben Messinformation vereinbar sind. Für den Beobachterentwurf wird eine endliche Anzahl aufeinanderfolgender Ausgangsmessungen auf eine bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung des vollständigen Systemzustands abgebildet. Der Ansatz wird anhand eines gedämpften Pendels mit dem Ausgang $y = \cos(\theta)$ demonstriert, das zwei symmetrische ununterscheidbare Trajektorien aufweist. Die Ergebnisse zeigen, dass der multimodale Beobachter beide ununterscheidbaren Zustandstrajektorien rekonstruieren kann.

Literatur

- [1] Röbenack, K.; Fiedler, J.; Gerbet, D.: High gain embedding observer design: combining differential geometry and algebra with machine learning, 2023 27th International Conference on System Theory, Control and Computing, IEEE, pp. 62–69, 2023.
- [2] Bernard, P.; Maghenem, M.: Reconstructing indistinguishable solutions via a set-valued KKL observer, *Automatica*, vol. 166, 111703, 2024.
- [3] Bishop, C. M.: Mixture density networks, Technical Report NCRG/4288, Aston University, Birmingham, 1994.

Zustands- und Parameterschätzung in adaptiv gekoppelten Kuramoto-Oszillatoren

T. N. Lundt*, A. Lepsien*, A. Schaum*

* Prozessanalytik und Computational Science Hub, Universität Hohenheim, Garbenstr. 23, 70599 Stuttgart, E-Mail: torben.lundt@uni-hohenheim.de

Netzwerke adaptiv gekoppelter Kuramoto-Oszillatoren dienen unter anderem als Paradigma für neuronale Aktivität, wobei sich die Kopplungsstärken mit der Phasendifferenz entwickeln, ein Analogon zur spike-timing-abhängigen Plastizität. Untersucht wurde in der Vergangenheit vor allem, welche Synchronisationszustände dabei auftreten [1]. Der Vortrag verfolgt hingegen die Frage, wie Kopplungsstärken und insbesondere Plastizitätsparameter zu wählen sind, sodass ein Oszillatorkette ein spezifisches Eingangs-Ausgangs-Verhalten erzeugt. Der Ansatz hierzu ist eine gemeinsame Zustands- und Parameterschätzung aus den gemessenen Phasen.

Betrachtet wird der Fall zweier Oszillatoren mit $i \neq j \in \{1, 2\}$,

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + k_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i), \quad \dot{k}_{ij} = -\gamma_{ij} k_{ij} + \mu_{ij} \Gamma(\theta_j - \theta_i),$$

mit dem Ausgang $y = [\theta_1 \ \theta_2]^T$, nicht messbaren k_{ij} , bekannten konstanten ω_i und unbekannten konstanten γ_{ij} und μ_{ij} .

Den Ausgangspunkt bildet eine Beobachtbarkeitsanalyse [2]. Das um die Parameter erweiterte System ist lokal beobachtbar, solange die Phasendifferenz hinreichend weit von Vielfachen von 2π entfernt bleibt und eine bei der Inversion der Beobachtbarkeitsabbildung auftretende Determinante nicht verschwindet. Typische Trajektorien verletzen beide Bedingungen wiederholt, die beobachtbaren Intervalle besitzen jedoch eine Mindestlänge, so dass ein Beobachter nicht unendlich schnell konvergieren muss. Dauerhaft wird der Verlust allein bei Phasensynchronisation, in der nur noch das Verhältnis μ_{ij}/γ_{ij} identifizierbar bleibt und die sich durch geeignete Eigenfrequenzen vermeiden lässt.

Darauf aufbauend werden zwei Entwürfe vorgestellt. Ein schaltender Beobachter [3] korrigiert nur innerhalb des beobachtbaren Bereichs und erreicht mit Hilfe der Mindestverweildauer Konvergenz im Mittel über die Schaltintervalle, wobei ein exakter Differenzierer höherer Ordnung die Ausgangsableitungen liefert. Ein Gradientenschätzer [4] verzichtet ganz auf die Zustandsschätzung. Nach Elimination der Kopplungsstärke ist die zweite Ausgangsableitung affin in den unbekannten Parametern, so dass ein Gradientenfluss auf dem Residuum genügt. Die Determinantenbedingung entfällt damit, und zwei statt vier Ableitungen je Phase reichen aus. Dieser Schätzer konvergiert schneller als ein erweiterter Kalman-Filter, verträgt Messrauschen jedoch schlechter. Analyse und Entwürfe werden im Zusammenhang dargestellt und anhand von Simulationsbeispielen demonstriert.

Literatur

- [1] Feketa, P.; Schaum, A.; Meurer, T.: Synchronization and multicluster capabilities of oscillatory networks with adaptive coupling, IEEE Trans. Autom. Control 66(7), S. 3084–3096, 2020.
- [2] Lundt, T. N.; Lepsien, A.; Feketa, P.; Meurer, T.; Schaum, A.: Parameter estimation in adaptively coupled Kuramoto oscillators, IFAC-PapersOnLine 59(26), S. 305–310, 2025.
- [3] Lundt, T. N.; Lepsien, A.; Schaum, A.: A sliding mode based switching observer for joint state and parameter estimation in adaptively coupled Kuramoto oscillators, Workshop on Variable Structure Systems, 2026.
- [4] Lundt, T. N.; Schaum, A.: Online parameter estimation for output-coupled nonlinear systems using exact differentiation, IFAC World Congress, 2026.

Hybrider Ansatz zur kombinierten Formations- und Containment-Regelung heterogener nichtlinearer Multiagentensysteme

A. Klyushina[†], L. Groß[†], J. Adamy[†]

[†]Fachgebiet Regelungsmethoden und Intelligente Systeme, Technische Universität Darmstadt, Landgraf-Georg-Str. 4, 64283 Darmstadt, Tel: +49(0)6151/16-25200, E-Mail: anna.klyushina@tu-darmstadt.de

Multiagentensysteme lösen komplexe Aufgaben durch die verteilte Koordination vieler kleiner, oft einfach aufgebauter Agenten. Gegenüber einem einzelnen, leistungsfähigeren System bieten sie Vorteile hinsichtlich Skalierbarkeit, Kosten und Fehlertoleranz, da die Gesamtfunktion selbst beim Ausfall einzelner Agenten erhalten bleibt. Eine besonders praxisrelevante Aufgabenstellung ist die kombinierte Formations- und Containment-Regelung. Dabei nimmt ein Teil der Agenten, die sogenannten *Leader*, eine vorgegebene, zeitabhängige Formation ein, während die übrigen Agenten, die *Follower*, dauerhaft innerhalb des von dieser Formation aufgespannten Gebiets verbleiben. Ein Anwendungsbeispiel ist eine Such- und Rettungsmission auf See.

Für diese Aufgabenstellung existieren zahlreiche Regelungsverfahren, die jedoch meist mindestens eine von drei Einschränkungen aufweisen: (i) Sie setzen homogene Agentendynamik oder identische Zustandsdimensionen voraus, (ii) sie benötigen für den Entwurf globale Information wie die Laplace-Matrix des Kommunikationsgraphen oder die Systemmatrizen der Leader, oder (iii) sie sind auf lineare Agentendynamik beschränkt. In realen Systemen sind die Agenten dagegen typischerweise nichtlinear, unterschiedlich aufgebaut und nur lokal vernetzt.

Im Vortrag wird ein hybrider Ansatz zur zeitabhängigen Formations- und Containment-Regelung heterogener nichtlinearer Multiagentensysteme vorgestellt, der diese Einschränkungen aufhebt. Die Methode kombiniert eine beobachterbasierte Kommunikationsstruktur mit einer nichtlinearen Trajektorienfolgeregelung, die für jeden Agenten individuell entworfen werden kann. Damit die Agenten für die Kommunikation keine globalen Informationen wie den kleinsten Eigenwert der Laplace-Matrix benötigen, werden die Informationen mittels vollständig verteilter adaptiver Beobachter entlang des Kommunikationsgraphen weitergeleitet [1]. Aus den Beobachterzuständen erzeugt jeder Agent lokal seine eigene zeitabhängige Referenztrajektorie. Diese Trajektorie erfüllt für die Leader das Formations- und für die Follower das Containment-Ziel. Im Vortrag wird gezeigt, dass durch diese Struktur der Beobachterentwurf vollständig vom Reglerentwurf entkoppelt ist. Daraus ergibt sich der zentrale Vorteil des Ansatzes: Für jeden heterogenen Agenten kann ein passender nichtlinearer Trajektorienfolgeregler gewählt werden, z. B. Gain-Scheduling, Feedback-Linearisierung, Sliding-Mode-Regelung oder Backstepping.

Zur Veranschaulichung wird im Vortrag ein Beispiel aus einer Such- und Rettungsmission auf See betrachtet. Das Beispielsystem besteht aus zehn autonomen Schiffen mit sechs Leadern und vier Followern. Alle Fahrzeuge werden durch ein Schiffsmodell mit Coriolis- und Dämpfungstermen [2] beschrieben, weisen aber unterschiedliche Massen- und Dämpfungsparameter auf, um ein heterogenes System zu bilden. Zudem werden die Agenten mit unterschiedlichen Methoden geregelt: einem adaptiven Backstepping-Regler [3] und einem exakt linearisierenden Regler. Im Beispiel werden externe Störungen in Form von Wind sowie Modellunsicherheiten berücksichtigt. Die Simulationsergebnisse werden im Vortrag vorgestellt und diskutiert (Abbildung 1).

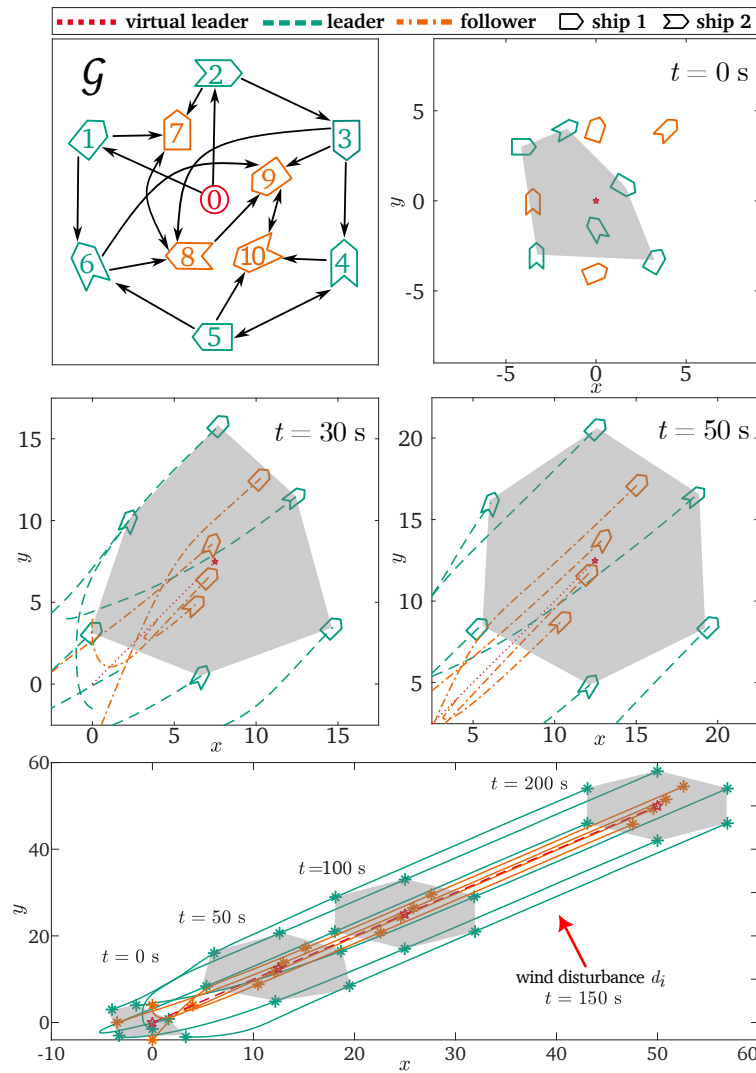


Abbildung 1: Simulierte Trajektorien eines Multiagentensystems, das das zeitabhängige Formations- und Containment-Ziel erreicht. Der durch die Leader-Positionen aufgespannte Sicherheitsbereich für die Follower ist durch den grau schattierten Bereich gekennzeichnet.

Literatur

- [1] W. Jiang, G. Wen, Z. Peng, T. Huang, und A. Rahmani. Fully distributed formation-containment control of heterogeneous linear multiagent systems. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 64(9):3889–3896, 2018.
- [2] R. Skjetne, Ø. N. Smogeli, und T. I. Fossen. A nonlinear ship manoeuvring model: Identification and adaptive control with experiments for a model ship. *Modeling, Identification and Control*, 25(1):3–27, 2004.
- [3] M. E. N. Sørensen und M. Breivik. Comparing nonlinear adaptive motion controllers for marine surface vessels. *IFAC-PapersOnLine*, 48(16):291–298, 2015.

Dreiecksformen für x -flache eingangsaffine Mehrgrößensysteme

Georg Hartl, Conrad Gstöttner, Markus Schöberl

Institut für Regelungstechnik, Johannes Kepler Universität Linz, Altenberger Straße 69,
4040 Linz, E-Mail: {georg.hartl, conrad.gstoettner, markus.schoeberl}@jku.at

Für die Analyse der Flachheit eingangsaffiner Mehrgrößensysteme

$$\dot{x} = f(x) + g_1(x)u^1 + \cdots + g_m(x)u^m \quad (1)$$

haben sich flache Dreiecksformen als äußerst nützlich erwiesen. Lässt sich (1) durch eine Zustandstransformation und eine statische Stellgrößentransformation auf eine flache Dreiecksform bringen, so kann man einen flachen Ausgang unmittelbar an den obersten Zuständen ablesen. Betrachtet werden dabei x -flache Ausgänge, also solche, die ausschließlich vom Zustand abhängen.

Einerseits existieren für bestimmte Dreiecksformen notwendige und hinreichende Bedingungen dafür, dass sich ein System der Form (1) in diese flache Dreiecksform überführen lässt [1, 2]. Durch diese vollständige Charakterisierung erhält man hinreichende Bedingungen für Flachheit und eine Vorschrift zur Berechnung eines flachen Ausganges, ohne das zugrunde liegende System explizit auf die Dreiecksform zu transformieren. In [3] wurde eine Multi-Chained-Form mit kompatibelem Drift [1] um lineare Teildynamiken erweitert und vollständig charakterisiert. Es wurde gezeigt, dass der 3D-Brückenkran ein Vertreter dieser auf einer Multi-Chained-Form basierenden Dreiecksform ist. Dadurch konnte die Lastposition des Brückenkrans systematisch als flacher Ausgang identifiziert werden.

Andererseits können flache Dreiecksformen auch geometrisch durch einen gegebenen flachen Ausgang beschrieben werden [4, 6]. Diese sehr allgemeinen Dreiecksformen enthalten die zuvor genannten Formen als Spezialfälle. Während eine vollständige geometrische Charakterisierung noch aussteht, lassen sich mithilfe dieser Dreiecksformen Algorithmen zur systematischen Berechnung von Kandidaten für flache Ausgänge entwickeln [5]. Basierend auf geometrischen Eigenschaften eines x -flachen Ausganges wurde in [6] eine möglichst allgemeine Dreiecksform für eingangsaffine Systeme mit drei Eingängen vorgestellt.

Dieser Vortrag gibt einen Einblick in die Rolle flacher Dreiecksformen bei der Flachheitsanalyse eingangsaffiner Mehrgrößensysteme und zeigt, wie sich die beiden vorgestellten Zugänge – die Charakterisierung von Dreiecksformen einerseits ausgehend von der originalen Systemdynamik, andererseits ausgehend von einem gegebenen flachen Ausgang – gegenseitig ergänzen.

Literatur

- [1] Li, S.J.; Nicolau, F.; Respondek, W.: Multi-input control-affine systems static feedback equivalent to a triangular form and their flatness, *International Journal of Control* 89 (2016) 1, S. 1–24.
- [2] Gstöttner, C.; Kolar, B.; Schöberl, M.: A structurally flat triangular form based on the extended chained form, *International Journal of Control* 95 (2022) 5, S. 1144–1163.

- [3] Hartl, G.; Gstöttner, C.; Schöberl, M.: A Flat Triangular structure based on a multi-chained form, 2026 European Control Conference (ECC), Reykjavík, Island 2026, S. 2104–2111.
- [4] Gstöttner, C.; Kolar, B.; Schöberl, M.: A triangular normal form for x-flat control-affine two-input systems, 2024 28th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Międzyzdroje, Polen 2024, S. 298–303.
- [5] Hartl, G.; Gstöttner, C.; Schöberl, M.: On triangular forms for x-flat control-affine systems with two inputs, 2025 29th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Cluj-Napoca, Rumänien 2025, S. 161–168.
- [6] Hartl, G.; Gstöttner, C.; Schöberl, M.: A structurally flat triangular form for three-input systems, 2026 IEEE 65th Conf. on Decision and Control (CDC), Honolulu, HI, USA 2026, angenommen. Preprint: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2604.02510>

Zertifizierte Benchmarks für Reinforcement Learning mittels stochastischer konverser Optimalität

P. Osinenko¹, S. Ibrahim², G. Ouerdane², H. Ouerdane², S. Streif⁴

¹ Central University (Moscow); CESS (Moscow); Sirius University, E-Mail: p.osinenko@yandex.ru

² CESS (Moscow); ³ Innopolis University / Moscow Center for Advanced Studies; ⁴ Technische Universität Chemnitz

Das Benchmarking von Reinforcement-Learning-Verfahren für Regelungsaufgaben ist oft nur relativ: man vergleicht erzielte Kosten oder Belohnungen, ohne die optimale Politik des Testproblems zu kennen. Dadurch bleibt unklar, ob ein Verfahren nahe am Optimum liegt oder lediglich besser als eine schwache Referenz ist. Wir stellen einen konstruktiven Ansatz vor, der dieses Problem umkehrt: Statt für ein gegebenes System die optimale Politik zu suchen, wird ein stochastisches nichtlineares System so konstruiert, dass eine vorgegebene Wertfunktion und die zugehörige Politik nachweislich optimal sind.

Ausgangspunkt ist ein diskretes stochastisches System

$$s_{k+1} = f(s_k) + g(s_k)a_k + w_k, \quad c(s, a) = q(s) + \rho(a).$$

Unter Regularitäts- und Integrierbarkeitsannahmen liefert eine stochastische konverse Optimalitätsaussage notwendige und hinreichende Bedingungen dafür, dass eine gewählte Funktion V^* die Bellman-Gleichung erfüllt. Im quadratischen Fall

$$\begin{aligned} V^*(s) &= s^\top P s + b, \quad c(s, a) = s^\top Q s + a^\top R a, \\ a^*(s) &= -\gamma B(s)^{-1} g(s)^\top P f(s), \quad B(s) = R + \gamma g(s)^\top P g(s) \end{aligned}$$

ergibt sich die optimale Rückführung. Die verbleibende Freiheit in der Dynamik wird durch eine Energiegleichung parametrisiert. Damit lassen sich Familien nichtlinearer, verauschter und skalierbarer Testsysteme erzeugen, deren Optimum analytisch bekannt ist und deren Bellman-Residual vor der Verwendung numerisch zertifiziert wird.



Die resultierenden Benchmarks erlauben absolute statt nur relative Bewertung: Jede gelernte Politik wird gegen das bekannte Optimum auf identischen Anfangszuständen und Rauschrealisationen ausgewertet. Die Metriken sind insbesondere die normierte Optimalitätslücke und der gepaarte Regret. Neben klassischem Deep RL kann derselbe Aufbau auch für interaktive, durch Large Language Models vorgeschlagene Regler verwendet werden: Das Modell sieht nur die black-box-Interaktion mit dem System, während die Auswertung verborgen gegen das zertifizierte Optimum erfolgt. So entsteht ein reproduzierbarer Prüfstand für lernende Regelungsverfahren, bei dem Nichtlinearität, Rauschstärke, Aktuatorgeometrie und Anfangszustandsbereich kontrolliert variiert werden.

Literatur.

- [1] Yaremenko, G.; Ibrahim, S.; Moreno-Mora, F.; Osinenko, P.; Streif, S.: Generating Informative Benchmarks for Reinforcement Learning. *IEEE Control Systems Letters* 9, 480–485, 2025.
- [2] Ibrahim, S.; Ouerdane, G.; Salloum, H.; Ouerdane, H.; Streif, S.; Osinenko, P.: Benchmarking Reinforcement Learning via Stochastic Converse Optimality. *IEEE Control Systems Letters* 12, 1321–1326, 2026.

Periodicity and Nonsmoothness in Optimal Control: Applications to Legged Robotics

Maximilian Raff

University of Stuttgart, Institute for Adaptive Mechanical Systems, Heisenbergstr. 3,
70569 Stuttgart, Tel: +49(0) 711 685 68155, E-Mail: raff@iams.uni-stuttgart.de

Many mechatronic systems move inefficiently when their natural dynamics are rejected rather than exploited. Autonomous systems provide a useful reference for understanding what motions the mechanics of a system can generate on their own. Because these systems do not rely on active control, no energy has to be supplied through the input channels; their periodic motions can therefore be regarded as energetically optimal for a broad class of actuation costs. Passive walkers illustrate this idea particularly clearly, as their natural dynamics can generate globally optimal limit cycles without active actuation. During my doctoral work, I developed analytical and computational methods for finding, continuing, and optimizing such motions in nonsmooth/hybrid dynamical systems [1, 2]. The guiding principle is that natural dynamics are not merely a modeling difficulty, but a resource for understanding how mechanics, optimal control, and design shape the available motions of a system.

The central mathematical object is a periodic optimal control problem for a hybrid dynamical system. A trajectory is decomposed into N phases, such as flight, stance, or other contact configurations. Within each phase the state evolves smoothly; between phases, event conditions and reset maps describe the discrete transitions. A compact form of the problem is

$$\begin{aligned}
 \min_{x_i, u_i, T_i} \quad & \sum_{i=1}^N \int_0^{T_i} \ell_i(x_i(t), u_i(t)) \, dt, \\
 \text{s.t.} \quad & \dot{x}_i(t) = f_i(x_i(t), u_i(t)), \quad t \in [0, T_i] \quad (\text{continuous dynamics}), \\
 & h_i(T_i, x_i(T_i), u_i(T_i)) = 0 \quad (\text{switching and operational conditions}), \\
 & x_{i+1}(0) = g_i(x_i(T_i)), \quad i = 1, \dots, N \quad (\text{discrete dynamics}), \\
 & x_{N+1}(0) = x_1(0) \quad (\text{periodicity}).
 \end{aligned}$$

In this formulation, nonsmoothness enters through the coexistence of continuous and discrete dynamics. The trajectory is assembled from smooth arcs, but the complete orbit contains switches and impacts; moreover, the feasible set may change when the sequence, timing, or activity of these events changes. Periodicity closes the hybrid cycle and turns the motion into a recurrent behavior rather than an isolated maneuver.

This perspective has led to methods for generating families of periodic orbits and energy-optimal gaits. Unactuated periodic motions provide meaningful seeds for trajectory optimization because they already solve the actuation problem in the limiting case of zero input. Building on this idea, passive motions can be continued into actuated gait families, connecting morphology, natural dynamics, and optimal control [3]. The resulting methods help explain how economical legged motions emerge from the interplay of mechanical structure, contact, and actuation.

Future work will extend this view from gait libraries toward a more systematic study of structure in mechanical optimization problems. One focus is model predictive control and turnpike behavior in hybrid and legged systems. In many long-horizon optimal control problems, solutions spend most of their time close to a characteristic optimal motion or set, with deviations mainly near the beginning and end of the horizon. For legged systems, an open question is whether such turnpike structures are periodic, how they interact with impacts and contact sequences, and how they can be used to classify optimal gaits or simplify predictive controllers.

Simpler mechanical systems can make these questions especially transparent. Consider, for example, a motorized sailplane that should travel between two points with minimal energy [4]. A naive solution might maintain nearly constant altitude and velocity, whereas an optimal solution may exploit the coupling between altitude, speed, gravity, and propulsion by alternating between climbing and descending arcs. Such a periodic or near-periodic pattern can act as a turnpike-like structure: the vehicle repeatedly returns to an energetically favorable cycle, while the boundary conditions determine how it enters and leaves this behavior. Although simpler than legged locomotion, the sailplane example exposes the same core questions: how do natural dynamics organize optimal motions, how does nonsmooth or constrained behavior shape the solution set, and how can these structures guide efficient mechatronic design and control?

References

- [1] Raff, M.; Rosa, N.; Remy, C. D.: Connecting gaits in energetically conservative legged systems, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(3):8407–8414, 2022. doi: 10.1109/LRA.2022.3186500.
- [2] Raff, M.; Remy, C. D.: Continuation of periodic orbits in conservative hybrid dynamical systems and its application to mechanical systems with impulsive dynamics, *Nonlinear Dynamics*, January 2025. ISSN 1573-269X. doi: 10.1007/s11071-024-10565-3.
- [3] Raff, M.; Flaßkamp, K.; Remy, C. D.: The indirect method for generating libraries of optimal periodic trajectories and its application to economical bipedal walking, 2026. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.09512>. Resubmitted major revision, *International Journal of Robotics Research (IJRR)*.
- [4] Lenz, J.: Optimisation of periodic flight trajectories. Dissertation, Technische Universität München, 2015.

Datengetriebene Qualitätsregelung beim Spritzgießen mit Inline-Qualitätsmessung

C. Jung^{†‡}, T. Magyar[‡], S. Strommer[‡], T. Glück[‡], W. Kemmettmüller[†]

[†] Automation and Control Institute (ACIN), TU Wien, Wien, Österreich, E-Mail: jung@acin.tuwien.ac.at

[‡] Center for Vision, Automation & Control, AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Wien, Österreich

Spritzgießen ist eine der wichtigsten Produktionsmethoden zur Herstellung von Kunststoffbauteilen. Zwar ist das Spritzgießen ein weitgehend automatisierter Prozess, doch können Änderungen von Material und Betriebsbedingungen die Produktion aus dem engen Qualitätsfenster führen [1]. Das einfach messbare Bauteilgewicht wird häufig als Qualitätsmaß verwendet. Aufgrund seines integralen Charakters können damit aber weder lokale Teilfüllungen noch Materialüberschuss am Bauteilrand (Grat) erkannt werden. Dieser Beitrag stellt einen geschlossenen Qualitätsregelkreis vor, der das Bauteilgewicht mit optischen Inline-Messungen von Füllgrad und Gratanzahl kombiniert.

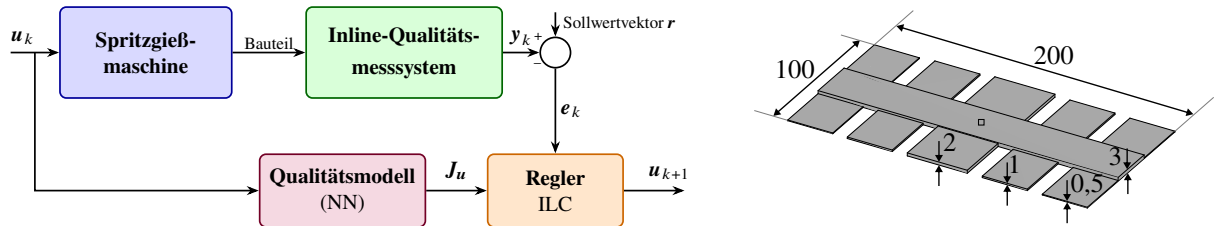


Abbildung 1: Architektur der zyklischen Qualitätsregelung (links) und kammförmiges Testteil (rechts); Maße in mm.

Abbildung 1 zeigt die Architektur der Qualitätsregelung, die von einem Produktionszyklus zum nächsten wirkt. Unter Verwendung der Maschineneinstellungen $u_k = [V_{s,k}, p_{H,k}, f_{cl,k}, v_{inj,k}]^T$ (Umschaltvolumen V_s , Nachdruck p_H , Schließkraft der Form f_{cl} , Einspritzgeschwindigkeit v_{inj}) fertigt die Spritzgießmaschine das Bauteil. Dieses wird mit dem Inline-Qualitätsmesssystem vermessen, womit die Qualitätsparameter $y_k = [y_{w,k}, y_{f,k}, y_{b,k}]^T$ (Bauteilgewicht $y_{w,k}$, Füllgrad $y_{f,k}$, Gratanzahl $y_{b,k}$) für das Bauteil bestimmt werden, siehe [4] für eine detaillierte Darstellung der Qualitätsmessung.

Der Kern der vorgestellten daten-basierten Qualitätsregelung ist ein Qualitätsmodell, welches die Auswirkung der Maschineneinstellungen u auf die Qualität y abbildet. Hierzu wird ein dreischichtiges neuronales MIMO-Netz f verwendet, welches anhand von Produktionsdaten eines statistischen Versuchsplans mit 480 Bauteilen trainiert wurde. Bekanntes Prozesswissen, etwa die monotone Abhängigkeit der Gratanzahl vom Nachdruck, wird über Monotoniebedingungen bereits im Training berücksichtigt. Damit werden physikalisch plausible lokale Gradienten des Qualitätsmodells sichergestellt.

Die Regelung der Bauteilqualität erfolgt von einem Zyklus zum nächsten. Dazu wird im Zyklus k die gemessene Qualität y mit dem Sollwert r verglichen. Mithilfe einer iterativ lernenden Regelung (ILC) wird anschließend ein Update Δu_k ermittelt, wobei die dazu notwendige Jacobi-Matrix J_u aus dem daten-basierten Qualitätsmodell bestimmt wird. Im Rahmen des Vortrags werden eine gradientenbasierte ILC (GB-ILC) und eine normoptimale ILC (NO-ILC) verglichen [3]. Dabei bestraft die NO-ILC zusätzlich Änderungen der Stellgrößen in Form der

Optimierungsaufgabe

$$\min_{\Delta \mathbf{u}_k} \|\mathbf{e}_k - \mathbf{J}_u \Delta \mathbf{u}_k\|_{\mathbf{Q}}^2 + \|\Delta \mathbf{u}_k\|_{\mathbf{R}}^2, \quad (1)$$

mit den Gewichtungsmatrizen $\mathbf{Q}$ und $\mathbf{R}$, womit ein gleichmäßigeres Konvergenzverhalten erreicht werden kann. Die Einhaltung von Maschinengrenzen wird durch geeignete Projektionen sichergestellt.

Der Nachweis der Funktion erfolgt durch Messungen an einer realen Spritzgießmaschine. Das verwendete Testteil (siehe Abbildung 1 rechts) ist durch ein besonders enges Prozessfenster charakterisiert. Insbesondere stellt die vollständige Füllung der dünnen äußeren Kavitätsbereiche ohne dass in den dickeren Bereichen Grate entstehen, eine wesentliche Herausforderung dar.

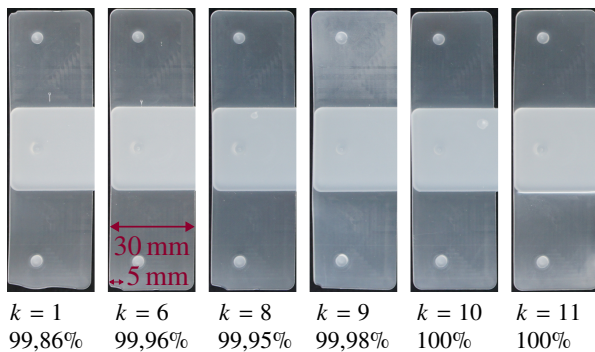


Abbildung 2: Nahaufnahmen der kritischen Bereiche des Testteils: Der Füllgrad steigt von 99,86% bei $k = 1$ auf 100% bei $k = 10$.

Ein Beispiel für die erfolgreiche Qualitätsregelung ist in Abbildung 2 dargestellt. Ausgehend von einem unvollständig gefüllten, untergewichtigen Bauteilen ($y_{f,1} \approx 99,86\%$) wird durch den vorgestellten Qualitätsregelkreis die gewünschte Bauteilqualität (Vollfüllung $y_{f,11} = 100\%$) bereits nach ca. 10 Spritzgießzyklen erreicht. Deutlich erkennbar ist, dass die Teilfüllung in den schwer füllbaren dünnen Bereichen vollständig verschwindet. Nach Wiederherstellung von Füllung und Bauteilgewicht behandelt die NO-ILC den zentralen Zielkonflikt: Sie senkt den Nachdruck zur Begrenzung der Gratanzahl und die

Schließkraft, sodass die vollständige Füllung erhalten bleibt. Die vorgestellte Qualitätsregelung kann sehr effizient berechnet werden und benötigt auf dem Prüfstandsrechner 8,1 ms. Dies ist deutlich weniger als die Zykluszeit von 30 s.

Im Vortrag werden die Vor- und Nachteile der beiden Versionen der ILC diskutiert und anhand von Messdaten validiert. Die Ergebnisse sind ausführlich in [4] dargestellt.

Literatur

- [1] Osswald, T. A.; Turng, L.-S.; Gramann, P.: *Injection Molding Handbook*, 2nd ed., Hanser, Munich, 2008. ISBN 978-3-446-40781-7.
- [2] Ginner, L.; Breuss, S.; Traxler, L.: Fast inline microscopic computational imaging, *Sensors*, 22(18), 7038, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22187038>
- [3] Owens, D. H.: Iterative learning control, in: *Encyclopedia of Systems and Control*, Springer, Cham, 2021. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5102-9_115-1
- [4] Jung, C.; Magyar, T.; Strommer, S.; Glück, T.; Kemmettmüller, W.: Data-driven cycle-to-cycle quality control of injection molding using inline visual inspection and part weight, SSRN, 2026. <https://doi.org/10.2139/ssrn.6880994>

Real-world Objects and Virtual Objects Management in Cognitive Internet of Things

A. Somov

Central University, 123056 Moscow, Russia, Tel: +7(916)7933595, E-Mail: a.somov@centraluniversity.ru

Current research in the field of the Internet of Things (IoT) is mainly focused on how to enable ordinary objects or “things” to make measurements themselves in the world around them, as well as connect them to a network for data exchange. The problems of sensor heterogeneity, the lack of functionality of measuring systems/services, and the increase in data generated are becoming obvious to the scientific community.

To address these problem the architecture of cognitive IoT has been proposed [1] (see Fig. 1).

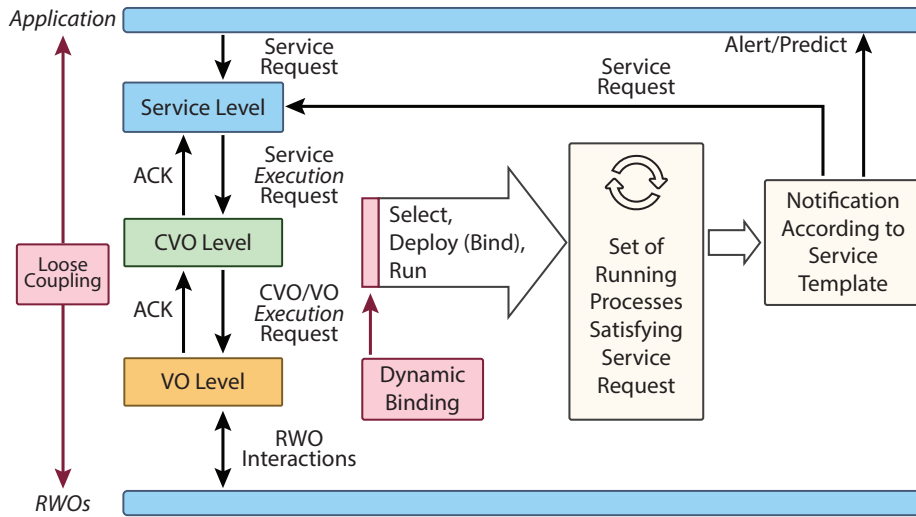


Abbildung 1: Architecture of cognitive Internet of Things.

Functioning of the cognitive IoT architecture begins with the submission of a service request (S_r) at the Service Level. S_r is submitted from a technical or non-technical user of the cognitive IoT architecture. The service request is decrypted into a formal request Q using a function F and a Virtual Composite Object (VCO) is created, which is necessary to fulfill the service request.

$$Q = F(S_r)$$

VCO Level - upon receiving a request from the service level, the VCO management unit searches the VCO registry for an existing VCO that can provide the requested service.

$$S^* = Match(Q, S_i),$$

where S^* is the selected template for the requested service and S_i is the service template from the repository that is mapped by the *Match* function to a formal request Q .

If such a VCO is unavailable, it searches the VO control unit to find the appropriate Virtual Objects (VO) capable of providing the required functionality in addition to meeting the constraints generated by the query.

$$S_E = L_s(S^*),$$

where S_E is the service execution request for the VCO and VO levels, L_s is the service logic, and S^* is the selected template for the requested service.

The available VCO, $V_{C_{active}}$, is modeled as follows:

$$V_{C_{active}} \subseteq \{ V_{C_j} \mid Fit(V_{C_j}, S_E) \geq \theta \},$$

where $V_{C_{active}}$ is the VCO corresponding to the request, V_{C_j} is the VCO instance, Fit is the matching function, θ is the threshold.

The VO level receives a request from the VCO level for VO preparation. VOs that meet all the requirements are combined to create a VCO, which can then independently provide the required service.

$$V_{S_{active}} \subseteq \{ V_{S_k} \mid Supports(V_{S_k}, F_{V_{C_{active}}}) = \text{True} \},$$

where $V_{S_{active}}$ is the VO providing the required functions, and V_{S_k} is the VO instance.

The VO layer is responsible for the virtualization of Real-World Objects (RWO), for example, sensors and actuators for any service needs.

The proposed architecture can be used in a number of industrial applications [2] including detection of weeds, classification of wastes, and gas leak detection.

Literatur

- [1] Somov, A.S.: Modeling the architecture of the cognitive internet of things for information and measurement systems and automated systems. Trudy MAI. 2025. No. 142. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185107>
- [2] Koshelev, I.; Savinov, M.; Menshchikov, A.; Somov A.: Drone-Aided Detection of Weeds: Transfer Learning for Embedded Image Processing. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 16, pp. 102-111, 2023.

Intelligentes Auslösen statt starres Abtasten: Ereignisbasierte Regelung im Spannungsfeld zwischen Regelgüte und Ressourcenverbrauch

Frank Allgöwer

Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik (IST), Universität Stuttgart
E-Mail: frank.allgower@ist.uni-stuttgart.de

Warum sollte ein Regler nur dann agieren, wenn es die Uhr vorgibt - und nicht dann, wenn es tatsächlich erforderlich ist? Die ereignisbasierte Regelung, sowie die eng verwandte selbstgetriggerte Regelung, stellen den traditionellen periodischen Regelungsansatz infrage, indem Rückkopplungsschleifen nur dann geschlossen werden, wenn es notwendig ist. Diese intelligenten und ressourcenbewussten Konzepte haben insbesondere in Bereichen wie vernetzten Systemen oder Echtzeitsystemen großes Interesse geweckt, da sie Effizienz versprechen, ohne die Regelungsziele zu beeinträchtigen. Mit der gewonnenen Flexibilität gehen jedoch erhebliche theoretische Herausforderungen einher. Welche Entwurfsparadigmen eignen sich, um leistungsfähige Auslösebedingungen zu bestimmen? Wie lassen sich das Abtastverhalten und die Eigenschaften des geschlossenen Kreises mathematisch rigoros analysieren? Welche Zielkonflikte entstehen zwischen Regelgüte und Auslösefrequenz? In diesem Vortrag geben wir einen Überblick über aktuelle Forschungstrends in der ereignisbasierten Regelung und beleuchten sowohl zentrale Durchbrüche als auch weiterhin offene Fragestellungen. Darüber hinaus skizzieren wir Verbindungen zu angrenzenden Gebieten wie zum Beispiel der neuromorphen Regelung und der ereignisbasierten Bildverarbeitung, diskutieren die historischen Wurzeln des Ansatzes und werfen einen Blick auf zukünftige Entwicklungsperspektiven.

Asynchrone sensitivitätsbasierte verteilte modellprädiktive Regelung

Maximilian Pierer von Esch[†], Knut Graichen[†]

[†]Lehrstuhl für Regelungstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Cauerstraße 7, 91058 Erlangen, Tel: +49(0)9131/85-27133, E-Mail: maximilian.v.pierer@fau.de

Die verteilte modellprädiktive Regelung (Engl.: Distributed Model Predictive Control, DMPC) ermöglicht die effiziente Regelung großskaliger, vernetzter Systeme durch die verteilte Lösung des zugrunde liegenden zentralisierten Optimalsteuerungsproblems [1]. Die meisten bestehenden kooperativen DMPC-Verfahren setzen allerdings eine synchrone Ausführung der genutzten Optimierungsalgorithmen voraus. In realen Kommunikationsnetzwerken führen jedoch unterschiedliche Rechenzeiten der Agenten sowie Kommunikationsverzögerungen zu Wartezeiten, welche die Echtzeitfähigkeit und Robustheit des DMPC-Schemas deutlich beeinträchtigen können.

Dieser Vortrag stellt einen asynchronen sensitivitätsbasierten Ansatz zur verteilten Lösung nichtlinearer Optimalsteuerungsprobleme vor [2]. Im Gegensatz zu einer strikten synchronen Ausführung führen die Agenten ihre Optimierungsschritte unabhängig voneinander aus und verwenden dabei die jeweils aktuell verfügbaren und gegebenenfalls veralteten Informationen ihrer Nachbarn. Unter der Annahme beschränkter Kommunikationsverzögerungen wird gezeigt, dass die lineare Konvergenz des synchronen Verfahrens in eine R-lineare Konvergenz übergeht. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird der Algorithmus in ein kooperatives DMPC-Verfahren integriert und es werden Bedingungen hergeleitet, welche trotz einer begrenzten Anzahl an asynchronen Optimierungsiterationen pro MPC-Schritt die lokale exponentielle Stabilität des geschlossenen Regelkreises gewährleisten [3].

Die theoretischen Ergebnisse werden anhand numerischer Simulationen sowie Hardwareexperimente auf einer verteilten Rechnerplattform mit netzwerkbasierter Kommunikation validiert. Obwohl die asynchrone Ausführung aufgrund der langsameren Konvergenz mehr Optimierungsiterationen benötigt, zeigen die Untersuchungen eine deutliche Reduktion der Gesamtausführungszeit durch eingesparte Wartezeiten gegenüber der synchronen Variante. Zusammenfassend stellt der vorgestellte Ansatz einen wichtigen Schritt zur Flexibilisierung und zur praktischen Umsetzbarkeit der verteilten modellprädiktiven Regelung nichtlinearer Systeme dar.

Literatur

- [1] Christofides, P.D.; Scattolini, R.; De La Pena, D.M.; Liu, J.: Distributed model predictive control: A tutorial review and future research directions, *Computers & Chemical Engineering* 51, pp. 21-41, 2013
- [2] Pierer v. Esch, M.; Völz, A.; Graichen, K.: Asynchronous Sensitivity-based Distributed Optimal Control for Nonlinear Systems, *IEEE American Control Conference (ACC)*, 2025.
- [3] Pierer v. Esch, M.; Völz, A.; Graichen, K.: Asynchronous Sensitivity-Based Distributed NMPC, *ArXiv preprint arXiv:2607.03412*, 2026

Zu Optimalität und Entwurf mit der Sontagschen Reglerformel

B. Lohmann[†], J. Bongard

[†]Lehrstuhl für Regelungstechnik, Technische Universität München, E-Mail: Lohmann@tum.de

Die quadratisch optimale Zustandsrückführung (LQR) ist ein verbreiteter Entwurf für lineare Systeme und erfolgt über die Lösung der algebraischen Riccati-Gleichung. Ist die Regelstrecke *nichtlinear*, so ist die Riccati-Gleichung durch die *Hamilton-Jakobi-Bellman-Gleichung* zu ersetzen, deren Lösung schwierig ist.

Im Vortrag wird gezeigt, dass die Sontagsche Reglerformel hier einen Ausweg bieten kann und ein gewichtetes quadratisches Gütemaß

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{1}{\lambda(x)} (x^T Q x + u^T R u) dt$$

zum Minimum macht [1]. Weiterhin wird für eingangs-zustandslinearisierbare Systeme eine geradlinige, konstruktive Vorgehensweise zur Gewinnung der dabei benötigten Regelungs-Ljapunow-Funktion (CLF) vorgestellt [2, 3].

Die Sontagsche Zustandsrückführung weist große Robustheit der Stabilität gegenüber Variation der Rückführverstärkung auf und kann auch unter Beschränkungen der Stellgrößen eingesetzt werden, worauf im Vortrag kurz eingegangen wird.

Literatur

- [1] Lohmann, B.; Bongard, J.: *A Discussion on Nonlinear Quadratic Control and Sontag's Formula*. <https://arxiv.org/abs/2301.10594>, 2023.
- [2] Sepulchre, R.; Janković, M.; Kokotović, P.: *Constructive Nonlinear Control*. Springer, 1997.
- [3] Bongard, J.; Lohmann, B.: *Control Lyapunov Functions for Optimality in Sontag-Type Control*. ECC 2025.

A Small Gain Theorem for Well-Defined but Not-Necessarily Well-Posed LTI Systems

J. Kowalewski[†], T. Moor[‡]

[†]Siemens Energy, Siemenspromenade 9, 91058 Erlangen, E-Mail: julia.kowalewski@siemens-energy.com

[‡]FAU Erlangen-Nürnberg, Cauerstraße 7, 91058 Erlangen, E-Mail: thomas.moor@fau.de

A stable open loop with gain below unity remains stable under negative feedback. This is the essence of the small gain theorem. The latter is known in many forms, ranging from scalar linear time-invariant systems with rational transfer functions to multivariable non-linear time-varying systems. The small gain theorem has been studied extensively. However, existing results do not address linear time-invariant systems with closed-loop sensitivities that are well-defined but not necessarily proper. While such systems are not physically realisable, they arise naturally as modelling artefacts in electrical network analysis. We present a variant of the small gain theorem tailored to this setting and provide some insight on how to prove it correct.

An RKHS perspective on algebraic estimator analysis and design

Matti Noack[†], Timm Faulwasser[†]

[†] Institute of Control Systems, TU Hamburg, Harburger Schloßstraße 22a, 21079 Hamburg ,
E-Mail: {matti.noack, timm.faulwasser}@tuhh.de

Algebraische Schätzerentwurfsverfahren und dabei insbesondere die Modulationsfunktionsmethode (MFM) haben sich für eine Vielzahl relevanter Problemstellungen etabliert wie etwa der Zustandsbeobachtung [3, 7, 8], Parameteridentifikation [1, 2] und die Rekonstruktion unbekannter Eingangssignale [6] sowie von Signalableitungen beliebiger Ordnung [4, 9]. Ursprünglich von der zeitkontinuierlichen Perspektive aus eingeführt [1], um lineare Differentialgleichungen direkt in eine Regressorform zu überführen, die konventionelle Parameterbestimmung ermöglicht, wurde die MFM seither stetig weiterentwickelt. Unter Anderem gab es Erweiterungen zur Anwendung auf zeitvariante [6, 11] sowie nicht-lineare Modelle bishin zu verteiltparametrischen Systemklassen.

Der zentrale Mechanismus besteht aus Integration mit der frei wählbaren Modulationsfunktion (MF) $\varphi \in \mathcal{H}^{n-1}(I)$ über das Zeitintervall I auf das Signal Ly , wobei $y \in \mathcal{L}_2^{\text{loc}}$ ein Messsignal und L einen linearen Differentialoperator der Ordnung $n \in \mathbb{N}$ ist. Dies wird als Skalarprodukt in $\mathcal{L}_2(I)$ dargestellt

$$\langle \varphi, Ly \rangle_{\mathcal{L}_2(I)} = \int_I \varphi(\tau) Ly(\tau) d\tau \stackrel{\text{RB}}{=} \langle L^* \varphi, y \rangle_{\mathcal{L}_2(I)}, \quad (1)$$

wobei eine Übertragung des Differentialoperators in adjungierter Form L^* hin zur MF stattfindet, wenn geeignete Randbedingungen (RB) ausgewählt sind. Dadurch können Differentialgleichungsprobleme in einen Satz algebraischer Gleichungssysteme überführt werden. Dies hat den zentralen Vorteil, dass bei Anwendung auf endlichem Horizont $I = [0, T], T \in \mathbb{R}$ ein Konvergenzverhalten in endlicher Zeit erzielt wird. Zugleich ermöglicht die integrale Realisierung des Schätzers eine natürliche Unterdrückung von Messrauschen und die Form der MF φ bestimmt maßgeblich dieses Filterverhalten. In der Regel wird die MFM über einen gleitenden Zeithorizont $[t - T, t]$ umgesetzt, was häufig in der Implementierung eines FIR Filters resultiert. Zudem gestattet die algebraische Struktur die einfache Konstruktion simultaner und adaptiver Schätzalgorithmen [6, 7]. Allerdings liegt eine der größten Herausforderungen in der geeigneten Wahl der MF innerhalb der vorgegebenen RB, um zum Beispiel bestimmte Robustheitsziele zu erreichen.

Das innere Produkt aus Gleichung (1) legt eine Sichtweise der MFM als Projektion innerhalb von bestimmten Hilberträumen nahe. In der Tat existieren innerhalb des MF Feldes bereits verschiedenste Betrachtungsweisen, die sich diesen Zusammenhang zu Nutze machen [3]. Schon früh begann [2] die Orthogonalitätseigenschaften in $\mathcal{L}_2$ zur Analyse und der Wahl von Modulationskernen zu nutzen. Diese spielen insbesondere beim algebraischen Differenzieren eine wesentliche Rolle [9], wobei das Annihilieren von Signalkomponenten in [4] aus der Klasse der *Reproducing Kernel Hilbert Spaces* (RKHS) heraus motiviert wurde. Weiterhin wird dadurch die Grundlage für die Schätzung unbekannter Eingänge gelegt [6]. Ein weiterer spezieller Ansatz zur MF Verwendung ist das sogenannte *Generalized Sampling* eingeführt von [5], womit eine zeitkontinuierliche Variante des Fundamentallemmas zur Daten-getriebenen Anwendung hergeleitet wird. In [8] werden auf der anderen Seite Volterra-Integrale mit MFs als Integralkern zum algebraischen Beobachterentwurf über einen wachsenden Horizont verwendet. Dadurch werden auch Fehlerabschätzungen

ähnlich zu den $\mathcal{L}_2$ aus [11] möglich. Die Zusammenhang mit schwachen Lösungen und der MF als Testfunktion wird von [10] herausgestellt. Hierbei wird gerade die Verbindung zu Sobolev-Räumen deutlich.

Die Verwendung der MF als Kern wird von den aufgeführten Arbeiten bereits angedeutet und genutzt. Die RKHS Perspektive einzunehmen, ermöglicht entsprechend der *Reproducing Property* die Charakterisierung des Signalraumes über die Kernfunktion. Dies eröffnet neue Analyse- und Entwurfs Optionen für die MFM. Der Präsentationsbeitrag verfolgt diese vereinheitlichende Betrachtungsweise des MF Ansatzes und setzt diesen in den RKHS Kontext. Das Ziel ist es, von den Werkzeugen aus dem etablierten Gebiet der RKHS-basierten Schätzung gezielt beim der Evaluation und dem Design algebraischer Schätzmethoden zu profitieren. Auf der anderen Seite ermöglicht dies aber auch Anwendern aus dem RKHS Bereich auf die zahlreichen Problemlösungsstrukturen der MFM zurückgreifen zu können.

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] Kraus, F. J.; Senning, M. F.: Signal Adapted Modulation Functions for Identification of Linear Continuous Time Systems, *IFAC Proceedings*, 20, S. 245–250, 1987.
- [3] Byrski, W.: The survey for the exact and optimal state observers in Hilbert spaces, *ECC*, S. 3548–3553, 2003.
- [4] Mboup, M. and Join, C. and Fliess, M.: Numerical Differentiation with Annihilators in Noisy Environment, *Numerical Algorithms*, 50, 4, S. 439–467, 2009.
- [5] Kinoshita, Y.; Ohta, Y.: Continuous-time system identification using compactly-supported filter kernels generated from Laguerre basis functions, *49th IEEE CDC*, S. 4461–4466, 2010.
- [6] 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.
- [7] Jouffroy, J.; Reger, J.: Finite-time simultaneous parameter and state estimation using modulating functions, *IEEE Conference on Control Applications*, S. 394–399, 2015.
- [8] Pin, G.; Chen, B.; Parisini, T.: Robust Deadbeat Continuous-Time Observer Design Based on Modulation Integrals, *Automatica*, 107, S. 95–102, 2019.
- [9] Othmane, A.; Kiltz, L.; Rudolph, J.: Survey on Algebraic Numerical Differentiation: Historical Developments, Parametrization, Examples, and Applications, *International Journal of Systems Science*, 53, 7, S. 1848–1887, 2022.
- [10] Messenger, D. A.; Tran, A.; Dukic, V.; Bortz, D. M.: The Weak Form Is Stronger Than You Think, *arXiv*, 2409.06751 [cs], 2024.
- [11] 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, *Automatica*, 183, S. 112696, 2026.

Fundamental limitations of digital control

S. Lang[†], F. Allgöwer[‡]

[†]University of Stuttgart, Institute for Systems Theory and Automatic Control,
Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart, Tel: +49 711 685 67754, E-Mail: lang@uni-stuttgart.de

[‡]University of Stuttgart, Institute for Systems Theory and Automatic Control,
Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart, Tel: +49 711 685 67733, E-Mail: allgower@uni-stuttgart.de

Digital communication and controller implementation have become ubiquitous in many modern control applications. However, digital control also imposes new challenges on the controller design as it imposes further requirements on the controller. One of the most important additional requirements is finite control range, i.e., in every finite time interval only finitely many control signals can be generated by the controller. This raises the question of what fundamental limitations controllers with finite control range have, and whether classical performance objectives can be achieved. In this talk, we investigate this question for the objective of quadratic performance and discuss that achieving quadratic performance requires controllers with infinite control range. This implies that controllers with finite control range, and therefore digital controllers, cannot achieve quadratic performance. Quadratic performance is a commonly used performance criterion which includes many important performance criteria, e.g., ℓ_2 -performance or passivity, as a special case.

In order to prove that achieving quadratic performance requires controllers with infinite control range, we introduce the notion of (ϵ, δ) -quadratic performance. (ϵ, δ) -quadratic performance is a control performance criterion whose fulfillment is implied by the fulfillment of many classical performance criteria, e.g., quadratic performance or generalized H_2 -performance. We exploit this property and show that achieving (ϵ, δ) -quadratic performance requires an infinite control range if the system possesses an unstable mode affecting the performance channel. Consequently, all performance criteria that implies fulfillment of (ϵ, δ) -quadratic performance require an infinite control range - including the criteria of quadratic performance and generalized H_2 -performance. This result also holds if a bound on the input signal energy is given.

An immediate implication of this result is that it is not possible to design digital controllers that can guarantee quadratic performance.

The results also imply that dissipativity with quadratic supply rates and dissipativity-based feedback theorems, such as the small-gain or passivity theorem, cannot be used to guarantee stability of feedback interconnections when the individual systems within the interconnection should be controlled digitally.

In view of the significance of digital control, these limitations show the importance of defining new notions of control performance which can be achieved by digital controllers and which mathematically describe properties which are practically desired.

This talk is based on our publication [1].

Literatur

- [1] Lang, S.; Allöwer, F.: Fundamental limitations of digital control: Quadratic performance and (Q, S, R) -dissipativity, Proc. of the 23rd IFAC World Congress, Busan, South Korea, 2026.

Koopman operator theory: fundamentals and data-driven approximation

Karl Worthmann,

Optimization-based Control Group, TU Ilmenau, E-Mail: karl.worthmann@tu-ilmenau.de

The linear, but infinite-dimensional Koopman operator enables analysis, prediction, and control of nonlinear dynamical systems through the lens of observable functions [4, 5]. Extended Dynamic Mode Decomposition (EDMD) and kernel EDMD are widely applied and computationally attractive methods to approximate the Koopman operator. The goal of this talk is threefold: First, we provide a concise introduction into Koopman operator theory [4]. Second, we give insight into the error analysis to derive uniform error bounds [3]. Hereby, we briefly touch upon Koopman invariance and its function-space dependent characterization [1]. Third, we leverage parabolic regularity to derive comparable results for stochastic dynamics under weaker regularity conditions [2].

Literatur

- [1] M. Colbrook, A. Mauroy, R. Moldenhauer, F.M. Philipp, M. Schaller, K. Worthmann: Koopman operator: invariant spaces, compactness, and self-adjointness, in preparation
- [2] M. Hertel, I. Klebanov, M. Schaller, and K. Worthmann: Verifiable regularity criterion for conditional expectation operators and conditional mean embeddings with applications to nonparametric regression, Bayesian inverse problems, and Koopman operators, arXiv preprint [arXiv:2608.06155](https://arxiv.org/abs/2608.06155)
- [3] F. Köhne, F.M. Philipp, M. Schaller, A. Schiela, and K. Worthmann: L^∞ -error bounds for approximations of the Koopman operator by kernel extended dynamic mode decomposition, SIAM Journal on Applied Dynamical Systems 24(1):501-529, 2025.
<https://doi.org/10.1137/24M1650120>
- [4] I. Mezić, J. Cortés, K. Worthmann, M. Lazar, and A. Lederer: Koopman operator theory: fundamentals, control, and applications, arXiv preprint [arXiv:2607.01819](https://arxiv.org/abs/2607.01819)
- [5] R. Strässer, K. Worthmann, I. Mezić, J. Berberich, M. Schaller, and F. Allgöwer. An overview of Koopman-based control: From error bounds to closed-loop guarantees. Annual Reviews in Control 61:101035, 2026.
<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2025.101035>

Stability of MPC based on data-driven input/output models

L. Bold^{*}, I. Schimperna[†], K. Worthmann^{*}, J. Köhler[‡]

^{*} Optimization-based Control Group, TU Ilmenau, E-Mail: lea.bold@tu-ilmenau.de

[†] Department of Electrical, Computer and Biomedical Engineering, University of Pavia

[‡] Department of Mechanical Engineering, Imperial College London

Model predictive control (MPC) requires a sufficiently accurate prediction model of the system under control. The use of data-driven surrogate models gained increasing popularity in the last years supported by many powerful learning methods. In many practical applications, however, the system state is not directly measurable and data-driven models have to be constructed based on input/output measurements. In [1], an MPC formulation without terminal conditions with output-weighting stage cost can be considered, which is only positive semi-definite with respect to the state. Consequently, standard stability results based on positive-definite stage costs cannot be applied directly and detectability properties have to be taken into account [2].

We construct a suitable storage function to establish cost detectability and, in combination with cost controllability, derive exponential stability for sufficiently long prediction horizons assuming exponential stabilizability and proportional approximation error bounds, building on the results in [3, 4].

Moreover, we verify the imposed conditions on the approximation using kernel interpolation and demonstrate the practical applicability to nonlinear systems by numerical simulations.

Literatur

- [1] Bold, L., Schimperna, I., Worthmann, K., & Köhler, J. (2026). *Exponential stability of data-driven nonlinear MPC based on input/output models*. IEEE Control Systems Letters.
- [2] Köhler, J., Zeilinger, M. N., & Grüne, L. (2023). *Stability and performance analysis of NMPC: Detectable stage costs and general terminal costs*. IEEE Transactions on Automatic Control, 68(10), 6114-6129.
- [3] Bold, L., Grüne, L., Schaller, M., & Worthmann, K. (2025). *Data-driven MPC with stability guarantees using extended dynamic mode decomposition*. IEEE transactions on automatic control, 70(1), 534-541.
- [4] Schimperna, I., Worthmann, K., Schaller, M., Bold, L., & Magni, L. (2026). *Data-driven model predictive control: Asymptotic stability despite approximation errors exemplified in the Koopman framework*. Automatica, 193, 113203.

Systematic Design of Stabilizing Model Predictive Controllers for Nonholonomic Systems

Emilia F. P. Krendelsberger*, **Jasmin Krauspenhaar†**, **Lea Bold***,
Mario Rosenfelder‡, **Peter Eberhard†**, **Henrik Ebel‡**, **Karl Worthmann***

* Optimization-based Control Group, Institute of Mathematics, Technische Universität Ilmenau, Germany, E-Mails: {emilia.krendelsberger, lea.bold, karl.worthmann}@tu-ilmenau.de

†Institute of Engineering and Computational Mechanics (ITM), University of Stuttgart, Germany, E-Mails: {jasmin.krauspenhaar, mario.rosenfelder, peter.eberhard}@itm.uni-stuttgart.de

‡Department of Mechanical Engineering, LUT University, Lappeenranta, Finland, E-Mail: henrik.ebel@lut.fi

Nonholonomic systems, which are characterized by the nonholonomic constraints on their velocities, are ubiquitous in applications such as transportation and robotics, yet their control remains challenging. In order to achieve asymptotic stability of a desired equilibrium, model predictive control (MPC) schemes without stabilizing terminal conditions have recently been proposed for nonholonomic kinematic systems, see the previous works [2, 6]. Here, stability was gained through the use of mixed-exponent stage costs, since conventional quadratic stage costs generally do not provide asymptotic stability of the MPC closed loop [5]. However, this approach still required lengthy system-specific calculations.

This work presents the recent development of a systematic design for MPC stage costs tailored to nonholonomic systems [4], where only a single calculation of parameters and coordinates is required. These are specific to the geometry of the nonholonomic system and can be used to form a controllable approximation of the system, as is described in [3]. Further, it is proven in [4] that, using a time-continuous MPC controller with these stage costs, the stability of the MPC closed loop is guaranteed through the homogeneity properties of the aforementioned approximation, using the results of [1].

Moreover, the proposed design methodology is extended beyond purely kinematic models to a wider class of systems with non-negligible dynamics, for which stability is shown in [4]. Then, the systematic design procedure is demonstrated, using the example of an articulated vehicle from [4]. The simulated setpoint stabilization is shown for the proposed stage costs, and compared to the use of conventional stage costs with quadratic exponents.

Literatur

- [1] Coron, J. M., Grüne, L., Worthmann, K.: *Model Predictive Control, Cost Contrabillity, and Homogeneity*. SIAM J. Control Optim., Vol. 58, No. 5, pp.2979-2996, 2020.
- [2] Ebel, H., Rosenfelder, M., Eberhard, P.: *A note on the predictive control of non-holonomic systems and underactuated vehicles in the presence of drift*. PAMM, vol. 23, no. 4, p. e202300022, 2023.
- [3] Jean, F.: *Control of Nonholonomic Systems: from Sub-Riemannian Geometry to Motion Planning*. Springer International Publishing, Cham 2014.

- [4] Krendelsberger, E. F. P., Krauspenhaar, J., Bold, L., Rosenfelder, M., Eberhard, P., Ebel, H., Worthmann, K.: *Systematic Design of Stabilizing Model Predictive Controllers for Nonholonomic Systems*. Soon to be published.
- [5] Müller, M. A., Worthmann, K.: *Quadratic costs do not always work in MPC*. Automatica, vol. 82, pp. 269–277, 2017.
- [6] Rosenfelder M., Ebel, H., Krauspenhaar, J., Eberhard, P., *Model predictive control of non-holonomic systems: Beyond differential-drive vehicles*. Automatica, vol. 152, p. 110972, 2023.

Data-driven Dynamic Modeling of Soft Robots for Agile Trajectory Tracking

M. Grube†, C. Duske†, R. Seifried†

†Institute of Mechanics and Ocean Engineering, Hamburg University of technology, Eißendorfer Straße 42, 21073 Hamburg, Tel: ++49(0)40/306012901, E-Mail: {malte.grube;robert.seifried}@tuhh.de

As robotics expands from industrial applications into an increasing number of domains, safety and flexibility are becoming ever more important. Soft robots are the most natural solution to these requirements. Typically made of soft materials such as silicone, soft robots can undergo large deformations and rely on inherent structural compliance. Currently, most soft robots are driven in a quasi-static way to avoid oscillations. However, as new, more agile applications of soft robotics emerge, the need for precise dynamic control methods is increasing. Feedback control for dynamic motion requires precise sensing, whereas feedforward control requires an accurate model of the controlled system.

The main challenge in using feedback control for soft robots is integrating sensors without compromising their softness. Model-based controllers can reduce the number of sensors required. The main challenges in modelling soft robots are their large elastic deformations, unknown material parameters and manufacturing inaccuracies. One solution is data-driven models, which typically require large amounts of training data. In soft robotics, quasi-static controllers are mainly used. However, these controllers neglect dynamics and are insufficient for advanced soft robot applications requiring increasingly faster and more accurate movements. Extending existing data-driven quasi-static control concepts directly to dynamic control is usually impractical due to the large quantity of required training data.

In this study, model-based control of soft robots using data-efficient, data-driven models of soft robot dynamics is investigated and demonstrated through experimentation. Two different beam-shaped, tendon-actuated soft robot arms are used as test systems, one of which is operated underwater. First, spectral submanifold reduction (SSMR) [1] is employed to model the soft robot's dynamics. The derived model is then used to control the robot.

Literatur

- [1] Cenedese, M., Axas, J., Yang, H., Eriten, M., Haller, G.: Datadriven nonlinear model reduction to spectral submanifolds in mechanical systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 380(2229) (2022) 20210194
- systems, Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, London 1999.
- Stabilization of Infinite Dimensional Systems with Applications, Springer, London 1999.

Experimentelle Untersuchungen einer modellprädiktiven Regelung mit symplektischer Diskretisierung an einem Zweipendelsystem

M. Klein, A. Othmane, K. Flaßkamp

Modellierung und Simulation technischer Systeme, Universität des Saarlandes, Campus Gebäude A5 1, 66123 Saarbrücken,
E-Mail: {mikl00006, amine.othmane, kathrin.flasskamp}@uni-saarland.de

Das Grundprinzip der (nichtlinearen) modellprädiktiven Regelung besteht in der wiederholten Lösung eines nichtlinearen Optimalsteuerungsproblems über einen endlichen Prädiktionshorizont [1]. Eine wesentliche Voraussetzung für die praktische Umsetzung ist die zeitliche Diskretisierung der Systemdynamik, die üblicherweise mittels Runge-Kutta-Verfahren erfolgt. Alternativ können auch Variationsintegratoren eingesetzt werden [2], die per Konstruktion symplektisch sind, da sie auf einer Diskretisierung des Wirkungsfunktional basieren [3]. In diesem Beitrag wird untersucht, welchen Einfluss die symplektische Diskretisierung im Vergleich zu etablierten Runge-Kutta-Verfahren auf die modellprädiktive Regelung hat.

Ausgangspunkt der variationellen Diskretisierung ist eine diskrete Lagrange-Funktion L_d , die das Wirkungsintegral über einen Zeitschritt annähert. Aus dem diskreten Hamiltonschen Prinzip [3] folgen die diskreten Euler-Lagrange-Gleichungen

$$D_2 L_d(q_{k-1}, q_k, h_{k-1}) + D_1 L_d(q_k, q_{k+1}, h_k) + f_d^-(q_k, q_{k+1}, h_k) + f_d^+(q_{k-1}, q_k, h_{k-1}) = 0, \quad (1)$$

wobei q_k die Konfiguration zum Zeitpunkt t_k , h_k die Schrittweite und $f_d^\pm$ die diskreten äußeren Kräfte bezeichnen. Ferner stehen D_1 und D_2 für die partiellen Ableitungen der diskreten Lagrange-Funktion nach ihrem ersten bzw. zweiten Konfigurationsargument. Gleichung (1) koppelt jeweils drei aufeinanderfolgende Konfigurationen und kann im Optimalsteuerungsproblem als Gleichungsnebenbedingung eingeführt werden, wie es in der diskreten Mechanik und Optimalsteuerung üblich ist [2]. Für die diskreten Impulse an den Zeitknoten erhält man die Darstellungen

$$p_k = -D_1 L_d(q_k, q_{k+1}, h_k) - f_d^-(q_k, q_{k+1}, h_k), \quad p_{k+1} = D_2 L_d(q_k, q_{k+1}, h_k) + f_d^+(q_k, q_{k+1}, h_k),$$

die es ermöglichen, Gleichung (1) als implizites Einschrittverfahren zu implementieren [3].

Die experimentellen Untersuchungen werden an einem erweiterten Furuta-Pendel durchgeführt, dessen Grundprinzip auf dem klassischen Furuta-Pendel basiert [4, 5]. Dieser in Abbildung 1 dargestellte Aufbau wurde an der Universität des Saarlandes als eine modulare, Open-Source-Plattform zum Einsatz in Forschung und Lehre entwickelt [6]. Ein um die Hochachse angetriebener Körper trägt zwei unabhängig gelagerte Pendel unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften. Mit dem Winkel des Körpers und den Pendelwinkeln ergeben sich drei Freiheitsgrade bei nur einem Stelleingang.

Betrachtet wird in dieser Arbeit das nichtlineare Regelungsproblem, eines der beiden Pendel aus der hängenden Ruhelage ohne vorberechnete Referenztrajektorie aufzuschwingen und anschließend in der instabilen oberen Ruhelage zu stabilisieren. Gleichzeitig wird angestrebt, die Auslenkung des zweiten Pendels möglichst gering zu halten. Hierzu wird das Regelungsproblem als nichtlineares Optimalsteuerungsproblem über einen endlichen

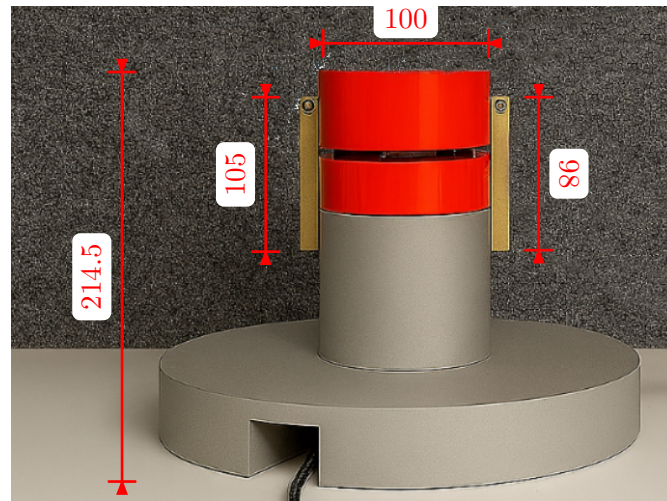


Abbildung 1: Versuchsaufbau des Zweipendelsystems mit annotierten Abmessungen in mm. Elektronische Komponenten sind nicht abgebildet.

Horizont formuliert, dessen wiederholte Lösung die Grundlage der eingesetzten modellprädiktiven Regelung bildet. Deren echtzeitfähige Implementierung erfolgt über *acados* [7]. Der Vergleich der symplektischen Diskretisierung mit klassischen Runge-Kutta-Verfahren auf äquidistanten und nichtuniformen Zeitgittern, wie sie beispielsweise in [5] verwendet werden, erfolgt anhand experimenteller Untersuchungen zur Regelgüte, zum Stellaufwand und zur Echtzeitfähigkeit der Implementierung.

Literatur

- [1] J. B. Rawlings, D. Q. Mayne, und M. Diehl. *Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design*. 2. Auflage, Nob Hill, San Francisco, 2020.
- [2] S. Ober-Blöbaum, O. Junge, und J. E. Marsden. Discrete mechanics and optimal control: An analysis. *ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations*, 17(2):322–352, 2011, doi:10.1051/cocv/2010012.
- [3] J. E. Marsden und M. West. Discrete mechanics and variational integrators. *Acta Numerica*, 10:357–514, 2001, doi:10.1017/S096249290100006X.
- [4] K. Furuta, M. Yamakita, und S. Kobayashi. Swing-up control of inverted pendulum using pseudo-state feedback. *Proc. Inst. Mech. Eng., I, J. Syst. Control Eng.*, 206(4):263–269, 1992, doi:10.1243/PIME_PROC_1992_206_341_02.
- [5] H. Homburger, J. Frey, S. Wirtensohn, M. Diehl, und J. Reuter. Millisecond NMPC for swing-up and stabilization of the Furuta pendulum in real world. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 2025. doi:10.1109/TCST.2025.3616367.
- [6] A. Othmane. SMS Pendulum Systems (Version 1.0) [Computer software], 2026, Zenodo, doi:10.5281/zenodo.21875325
- [7] R. Verschueren et al. *acados* – a modular open-source framework for fast embedded optimal control. *Mathematical Programming Computation*, 14(1):147–183, 2022, doi:10.1007/s12532-021-00208-8.

Predictor-Based Extremum Seeking for Optimal Wake Steering in Wind Farms

A. Othmane†, D. Bresch-Pietri‡

†Systems Modeling and Simulation, Saarland University, Saarbrücken, Germany, E-Mail: amine.othmane@uni-saarland.de

‡Centre Automatique et Systèmes, Mines Paris – PSL, Paris, France, E-Mail: delphine.bresch-pietri@minesparis.psl.eu

A wind turbine extracting momentum from the incoming flow generates a wake, a downstream region of reduced velocity that recovers only over several rotor diameters, so that in commercial farms, where turbine spacings are of that same order, these wakes substantially reduce the power extracted by downstream turbines [1]. *Wake steering*, the deliberate yaw misalignment of upstream rotors in order to deflect their wakes away from the downstream rotors, is the most advanced of the available actuation mechanisms in terms of commercial realization [2]. Current practice is model-based and quasi-static: a steady-state wake model is calibrated offline and the yaw set-points maximizing the predicted farm power are computed from it [3], then deployed in the field as a look-up table indexed by the ambient conditions [4]. Field campaigns demonstrate the potential of this approach but also reveal its limitations: the realized gains depend strongly on the ambient conditions, being higher and more consistently realized in stable atmospheric conditions than in unstable ones [4], and the performance of this open-loop architecture depends strongly on the accuracy of the underlying model [2]. This motivates *model-free* extremum seeking (ES), which updates the set-points directly from power measurements [5].

The principal difficulty at farm level is that a wind farm does not constitute a static map. Control-oriented dynamic wake models represent the wake as a transport equation advected by the free-stream flow [6], so that a yaw variation at an upstream turbine affects a downstream rotor only after the perturbed wake has traversed the inter-turbine distance. For spacings of several hundred metres, the resulting transport delays range from tens of seconds to minutes and differ between channels. They are furthermore inherently time-varying whenever the wind speed is. Such delays destabilize classical ES [7]. Since the dither is not advanced to compensate them, each channel delay reappears in the recovered gradient as a multiplicative cosine factor that may vanish or change sign. Within the standard averaging analysis the delay can then only be accommodated by lowering the dither frequencies, which drastically slows convergence [8].

In this contribution and starting from the transport model, farm power maximization is reformulated as a static optimization coupled through multiple, distinct, time-varying input delays, the delay structure being identified from the flow physics rather than postulated. A predictor-based multivariable ES scheme, formulated in both gradient- and Newton-based form and following the multiple-delay ES designs of [7], compensates these delays channelwise using only real-time farm-power and free-stream wind-speed measurements and no wake-model parameters. Three aspects are specific to the application. First, the steady farm power factorizes exactly as a cube in the wind speed, so that the optimal yaw configuration is wind-speed invariant. Second, the scheme uses a smooth ternary dither carrier whose zero-hold interval and bounded slew rate enable the yaw actuator to follow the excitation without violating its rate limit, and an averaging argument establishes that

gradient and Hessian recovery is preserved. Third, the formulation localizes exactly to any turbine cluster, so that large farms decompose into independent, parallelizable ES instances.

The scheme is evaluated on a three-turbine array against a non-causal optimal control benchmark that maximizes farm power with the entire wind trajectory known. The channel delays follow from the wake advection and reach 95 s at 9 m/s. With a single fixed tuning, both predictor laws converge from greedy (zero-yaw) initialization and yield a farm-power increase of 3 to 4% over greedy operation between 7 and 12 m/s, attaining 98.7 to 100.2% of the benchmark, whereas the uncompensated scheme is destabilized at the same dither frequencies. A measured hub-height wind record confirms that the same tuning tracks the optimizer under genuinely time-varying delays.

References

- [1] Porté-Agel, F.; Bastankhah, M.; Shamsoddin, S.: Wind-turbine and wind-farm flows: a review, *Boundary-Layer Meteorology* 174(1), pp. 1–59, 2020.
- [2] Meyers, J. et al.: Wind farm flow control: prospects and challenges, *Wind Energy Science* 7(6), pp. 2271–2306, 2022.
- [3] Gebraad, P. M. O. et al.: Wind plant power optimization through yaw control using a parametric model for wake effects, *Wind Energy* 19(1), pp. 95–114, 2016.
- [4] Fleming, P. et al.: Initial results from a field campaign of wake steering applied at a commercial wind farm – Part 1, *Wind Energy Science* 4(2), pp. 273–285, 2019.
- [5] Kumar, D.; Rotea, M. A.; Aju, E. J.; Jin, Y.: Wind plant power maximization via extremum seeking yaw control: a wind tunnel experiment, *Wind Energy* 26(3), pp. 283–309, 2023.
- [6] Shapiro, C. R.; Gayme, D. F.; Meneveau, C.: Modelling yawed wind turbine wakes: a lifting line approach, *Journal of Fluid Mechanics* 841, R1, 2018.
- [7] Oliveira, T. R.; Krstić, M.; Tsubakino, D.: Extremum seeking for static maps with delays, *IEEE Transactions on Automatic Control* 62(4), pp. 1911–1926, 2017.
- [8] Wu, Z.; Li, Y.: Optimal control of wind farm power output with delay compensated nested-loop extreme seeking control, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 15(4), 043301, 2023.

Analysis and Model Predictive Control of Mechanical Multibody Systems Subject to Non-Integrable Acceleration-Level Constraints

**M. Rosenfelder^{*}, J. Krauspenhaar^{*}, E. Krendelsberger[†], L. Bold[†]
K. Worthmann[‡], H. Ebel[‡], P. Eberhard^{*}**

^{*} Institute of Engineering and Computational Mechanics (ITM), University of Stuttgart, Germany, E-Mail: {mario.rosenfelder, jasmin.krauspenhaar, peter.eberhard}@itm.uni-stuttgart.de

[†] Optimization-based Control Group, Institute of Mathematics, Technische Universität Ilmenau, Germany, E-Mail: {emilia.krendelsberger, lea.bold, karl.worthmann}@tu-ilmenau.de

[‡] Dynamics & Control Research Group, Department of Mechanical Engineering, LUT University, Finland, E-Mail: henrik.ebel@lut.fi

Over the past decades, multibody systems have been studied extensively in the context of modeling and simulation. General formulations have been developed to describe the dynamics of mechanical systems subject to a wide variety of constraints. In addition to classical holonomic constraints, which can be expressed as algebraic equations on the position level, nonholonomic constraints play an important role in many applications. One of the most prominent examples is the no-lateral-slip condition for wheeled vehicles, which constitutes a kinematic constraint that cannot be integrated into an equivalent position-level constraint and is therefore representative of nonholonomic kinematic systems.

Non-integrable constraints may, however, also arise on the acceleration level. Such constraints typically do not originate directly from physical contact, but rather emerge as a mathematical description of underactuated mechanical systems that do not possess potential forces in the directions of the unactuated degrees of freedom. Examples include surface vessels and underactuated underwater vehicles as well as underactuated manipulators, see, e.g. [5, 3, 4]. Similar to systems subject to conventional nonholonomic constraints at the velocity level, this class of systems poses significant challenges for setpoint stabilization. In particular, controllability is lost when the system dynamics is linearized around a desired setpoint, and no smooth, time-invariant feedback law exists that asymptotically stabilizes the system [8]. This naturally raises the question of how suitable setpoint controllers can be designed for this class of systems.

The present talk addresses this question by investigating how recent results [7] on model predictive control (MPC) for systems subject to nonholonomic kinematic constraints can be extended to systems with non-integrable constraints on the acceleration level, also referred to as second-order nonholonomic constraints. A key ingredient of the geometry-conforming MPC approach proposed therein is the derivation of a homogeneous approximation of the system dynamics, which can subsequently be used to construct a tailored mixed-exponents stage cost following [2]. Initial work in this direction for the system class under consideration yielded promising results [6], but relied on mechanical insight into the particular system under consideration. The focus here is therefore on whether, in the more general setting, an appropriate set of coordinates can be selected systematically to derive a homogeneous approximation of the dynamics, analogous to the use of privileged coordinates for conventional nonholonomic kinematics [1]. The resulting methodological questions are illustrated using a representative mechanical system subject to second-order nonholonomic constraints, e.g., an omnidirectional mobile robot equipped with a mounted unactuated arm.

References

- [1] André Bellaïche. The tangent space in sub-Riemannian geometry. In Andre Bellaïche and Jean-Jacques Risler, editors, *Sub-Riemannian Geometry*, volume 144 of *Progress in Mathematics*, pages 1–78. Birkhäuser, Basel, 1996.
- [2] Jean-Michel Coron, Lars Grüne, and Karl Worthmann. Model predictive control, cost controllability, and homogeneity. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 58(5):2979–2996, 2020.
- [3] Daniel A. Duecker, Nathalie Bauschmann, Tim Hansen, Edwin Kreuzer, and Robert Seifried. HippoCampusX – a hydrobatic open-source micro AUV for confined environments. In *Proceedings of the 2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV)*, pages 1–6, St. Johns, 2020.
- [4] Giuseppe Oriolo and Yoshihiko Nakamura. Control of mechanical systems with second-order nonholonomic constraints: underactuated manipulators. In *Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control*, volume 3, pages 2398–2403, Brighton, 1991.
- [5] Mahmut Reyhanoglu. Exponential stabilization of an underactuated autonomous surface vessel. *Automatica*, 33(12):2249–2254, 1997.
- [6] Mario Rosenfelder, Henrik Ebel, and Peter Eberhard. On the design of model predictive setpoint controllers for nonholonomic multibody systems. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics (PAMM)*. (accepted for publication).
- [7] Mario Rosenfelder, Henrik Ebel, Jasmin Krauspenhaar, and Peter Eberhard. Model predictive control of non-holonomic systems: Beyond differential-drive vehicles. *Automatica*, 152:e110972, 2023.
- [8] Kristin Y. Wichlund, Ole Jakob Sørдалen, and Olav Egeland. Control properties of underactuated vehicles. In *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 2009–2014, Nagoya, 1995.

Turnpike properties in nonlinear system identification

Julian D. Schiller, Matthias A. Müller

Leibniz University Hannover, Institute of Automatic Control, Appelstr. 11, 30167 Hannover,
 E-Mail: {schiller,mueller}@irt.uni-hannover.de

Learning nonlinear state-space models from input-output data is a central problem in system identification. If accurate multi-step predictions are of interest, a natural approach is simulation error minimization (SEM), where the parameters of a dynamical model are obtained by minimizing the discrepancy between measured and simulated outputs over a finite dataset [1]. For nonlinear models and long datasets, however, solving the resulting optimization problem can become computationally demanding. This is particularly relevant for recurrent neural networks and related nonlinear state-space models, where training requires forward simulation and corresponding sensitivity computations over long time horizons. Practical approaches therefore frequently perform SEM over shorter subsequences and fix their initial states, possibly after a finite burn-in phase [4]. This raises the question of when the resulting solution is nevertheless representative of the original SEM problem in which the initial state is optimized jointly with the model parameters.

We study this question using *turnpike* properties, which classically describe the phenomenon that optimal trajectories remain close to an optimal steady state or reference trajectory for most of the time [2, 3]. Specifically, we consider a discrete-time nonlinear state-space model

$$x^+ = f(x, u; \theta), \quad y = h(x, u; \theta),$$

with states x , inputs u , outputs y , the parameter vector θ to be identified, and the SEM objective

$$J(x_0, \theta) = \sum_{j=0}^N \beta_j l(y_j(x_0, \theta), y_j^d) + r(\theta).$$

Here, the stage cost l penalizes the difference between model outputs $y_j(x_0, \theta)$ and given measurement data y_j^d , while r denotes a regularization term and β_j is a user-defined scalar weighting. We distinguish the unconstrained SEM problem, where both x_0 and θ are optimized, from a computationally simpler constrained problem in which the initial state x_0 is fixed to some $\bar{x}$ and only θ remains a decision variable.

In contrast to classical optimal control, the turnpike is naturally formulated here in terms of *outputs*. Moreover, optimal model parameterizations and even optimal output sequences need not be unique, as is particularly relevant for overparameterized black-box models. The corresponding *cumulative output turnpike* property requires the existence of $\alpha \in \mathcal{K}_\infty$ and $E > 0$, independent of the training dataset length N , such that

$$\sum_{j=0}^N \alpha (\|y_j(\bar{x}, \theta') - y_j(x_0^*, \theta^*)\|) \leq E$$

for every constrained optimum θ' and every associated closest unconstrained optimum (x_0^*, θ^*) ; the corresponding optimal output sequence $y_j(x_0^*, \theta^*)$, $j \in [0, N]$, is referred to as the *turnpike*. Hence, the average output discrepancy vanishes as $N \rightarrow \infty$, while individual discrepancies at all time instants remain uniformly bounded.

Our main result provides a system-theoretic characterization of this property [5]. Under a mild cost-reachability condition, we establish the equivalence

$$\text{cumulative output turnpike} \iff \text{coercivity} \iff \text{strict dissipativity}. \quad (\star)$$

The dissipativity notion is tailored to system identification: its supply rate compares the cost generated by a constrained solution with that of its associated optimal output sequence, while the storage function may depend on the finite dataset length. This extends classical connections between turnpike properties and strict dissipativity in optimal control [2, 3] to SEM problems with potentially non-unique and horizon-dependent turnpikes.

We additionally investigate the weaker *cardinality turnpike* property, which bounds the number of time indices at which a constrained optimal output lies outside a neighborhood of its turnpike. We show that cumulative turnpike behavior always implies cardinality turnpike behavior. The converse, however, is false in general, which we prove by constructing a corresponding counterexample.

Finally, we derive sufficient conditions under which turnpike behavior arises in nonlinear system identification. Specifically, we show that cost reachability follows from incremental output stability of the model, while coercivity of the value function follows under uniform strict convexity of the stage cost and a suitable optimality condition. Together with the equivalence result $(\star)$, these conditions establish cumulative turnpike behavior.

The theory is illustrated for a scalar Elman-type recurrent neural network, for which the relevant conditions can be verified analytically. The example also explicitly exhibits a non-unique optimal solution set for a short training horizon and illustrates how the cumulative output discrepancy remains bounded as the dataset size N increases.

Overall, these results provide a theoretical explanation for why computationally convenient SEM formulations with fixed initial states can yield output sequences close to those of the corresponding unconstrained identification problem, and establish connections between system identification, stability, dissipativity, and turnpike theory.

References

- [1] L. Ljung, System Identification: Theory for the User, 2 ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1999. 14th printing.
- [2] T. Faulwasser, L. Grüne, Turnpike properties in optimal control, in: E. Trélat, E. Zuazua (Eds.), Handbook of Numerical Analysis, volume 23, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 2022, pp. 367–400.
- [3] L. Grüne, M. A. Müller, On the relation between strict dissipativity and turnpike properties, Syst. Control Lett. 90 (2016) 45–53.
- [4] J. D. Schiller, M. Heinrich, V. G. Lopez, M. A. Müller, Tuning the burn-in phase in training recurrent neural networks improves their performance, in: Proc. Int. Conf. Learn. Represent. (ICLR), 2026.
- [5] J. D. Schiller, M. A. Müller, Turnpike properties in nonlinear system identification, under preparation, 2026.

Reduced-order Modeling in the Age of AI

P. Benner†

†Max Planck Institute for Dynamics of Complex Technical Systems, Sandtorstr. 1, 39106 Magdeburg, Germany, Tel: ++49(0)391/6110450, E-Mail: benner@mpi-magdeburg.mpg.de

Classical model order reduction (MOR) methods compute a reduced-order model (surrogate) of a large-scale mathematical model that describes some technical, physical, chemical, biological, social or other real-world process. This mathematical model is often obtained from a discretization, e.g., via finite differences or finite elements, of some partial differential operators. The dominating projection-based MOR approach identifies a linear low-dimensional subspace V of the state space and some projector P_V onto this space. The model is then projected onto V , and an approximation of the original state of the model can be constructed from an appropriate linear combination of the basis vectors spanning V . From a machine learning perspective, projection-based MOR is nothing else but an autoencoder, where V is then the latent space, P_V the encoder and the construction of the approximate full-order state vector the decoder. The advantage of this interpretation is that we can now use different approaches for the different elements of an autoencoder. The encoder can select a nonlinear manifold for the latent space, the model describing the states in the latent space can be based on learning the model description from data, and the decoder can also be a nonlinear map. Allowing nonlinear maps for the encoder and the decoder paves the way for new methods that overcome the problem of slowly decaying Kolmogorov n -width limiting the practicality of projection-based MOR for problems with transport-dominated character, while learning the model in the latent space from data allows for non-intrusive methods that do not need to access the full-order model in order to identify a reduced-order surrogate. Based on these observations, we will discuss some of the approaches that extend the field of MOR into the era of Artificial Intelligence by using the generalized MOR philosophy of autoencoders and by making use of deep and machine learning approaches to identify nonlinear encoders and decoders as well as latent space models.

Parameteridentifikation $Q(U)$ - geregelter Energieerzeugungsanlagen am Modell eines umrichtergekoppelten Windparks zur Erkennung von Fehlparametrierungen

Lukas Neumann[†], Sebastian Krahmer[‡], Klaus Röbenack[†]

[†]Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie, TU Dresden

E-Mail: {lukas.neumann, klaus.roebenack}@tu-dresden.de

[‡]Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik, TU Dresden

E-Mail: sebastian.krahmer@tu-dresden.de

Moderne Stromnetze unterliegen hohen Anforderungen an die Bereitstellung von Blindleistung, um einen flexiblen Netzbetrieb und Spannungsstabilität zu gewährleisten. Mit $Q(U)$ -Kennlinien ausgestattete Dezentrale Energieanlagen (DEA) leisten einen erheblichen Beitrag zur Blindleistungsbereitstellung. Die infolge der Verkopplung über das Netz notwendige Stabilitätsbetrachtung des MIMO-Systems ist auf Kenntnis der jeweiligen Anlagenparameter angewiesen [1]. Durch Wartungsarbeiten oder Software-Updates auftretende versehentliche Parameteränderungen in der Steuertechnik erfordern die Überprüfung der Parameter während der gesamten Lebensdauer der DEA. Inhalt ist daher die Anwendung einer Parameteridentifikation auf $Q(U)$ -geregelter Erzeuger am Beispiel des Modells eines umrichtergekoppelten Windparks nach [2] (Abb. 1). Die Identifikation zielt auf die Nutzung von im Nominalbetrieb zugänglichen Messdaten.

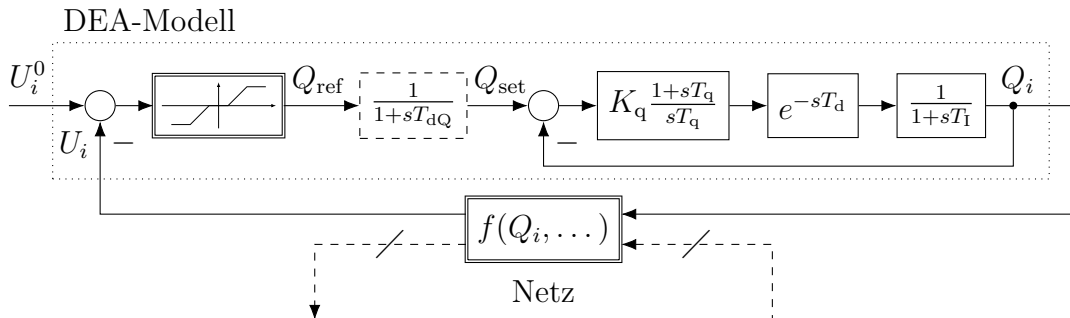


Abbildung 1: Modell der Spannungshaltung eines umrichtergekoppelten Windparks nach [2], bestehend aus $Q(U)$ -Statik und unterlagerter Blindleistungsregelung, als Knoten i im Elektroenergieversorgungsnetz.

Das DEA-Modell wird dazu in die statisch-nichtlineare $Q(U)$ -Kennlinie und die unterlagerte dynamische Blindleistungsregelung unterteilt. Anschließend werden angepasste Identifikationsmethoden mit Hilfe der SciPy-Bibliothek [3] angewendet. Zur Identifikation der $Q(U)$ -Statik werden lokale und globale Optimierungsansätze evaluiert. Das totzeitbehaftete Modell der unterlagerten Blindleistungsregelung wird durch eine Padé-Approximation parameter-linearisiert, um eine gewöhnliche Schätzung mit der linearen Methode der kleinsten Quadrate zu ermöglichen. Die so gewonnene Schätzung kann nachfolgend als Startwert einer iterativen Optimierung der originalen Modellgleichung dienen. Ausgehend von idealisierten, synthetisch verrauschten Signalen wird die Identifikation mit realitätsnahen Daten einer vereinfachten Netzsimulation in unterschiedlichen Szenarien verifiziert.

Literatur

- [1] S. Krahmer, S. Ecklebe, P. Schegner und K. Röbenack, „Zur Notwendigkeit von Stabilitätsbetrachtungen von Umrichterinteraktionen bei der Sicherheitsbewertung in Verteilnetzen,“ *at - Automatisierungstechnik*, Jg. 71, Nr. 12, S. 1051–1064, 2023. DOI: 10.1515/auto-2023-0142
- [2] S. Krahmer, S. Ecklebe, P. Schegner und K. Röbenack, „Application of Stability Analysis of Q(V)-Characteristic Controls Related to the Converter-Driven Stability in Distribution Networks,“ *IEEE Transactions on Industry Applications*, Jg. 60, Nr. 3, S. 5002–5011, 2024. DOI: 10.1109/TIA.2024.3360023
- [3] P. Virtanen u. a., „SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python,“ *Nature Methods*, Jg. 17, S. 261–272, 2020. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2
- [4] R. Isermann, *Identifikation Dynamischer Systeme 2 Besondere Methoden, Anwendungen*, 2., neubearb. Aufl. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 1992, ISBN: 978-3-642-84770-7.
- [5] L. Neumann, S. Krahmer, K. Röbenack und M. Wolter, „System Identification of Q(U)-controlled Distributed Energy Resources for Detection of Model Inconsistencies,“ in *Power System Dynamics Summit (PoSyDyS)*, 2026, angenommen.

Comparing Residual and Full Data-Driven Inverse Dynamics Models for an Industrial Delta Robot

P. Kaiser*, J. Gesell*, D. Pfeifer‡, J. Fehr*

*Institute of Engineering and Computational Mechanics, University of Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart, Tel: +49(0)711/68566388, E-Mail: {philipp.kaiser, jakob.gesell, joerg.fehr}@itm.uni-stuttgart.de

‡ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Gropiusplatz 10, 70569 Stuttgart, E-Mail: denis.pfeifer@isg-stuttgart.de

Delta robots are parallel kinematic machines used for fast handling tasks such as pick-and-place. The parallel structure keeps the moving mass low and allows high accelerations, but it also makes the dynamics difficult to model: the inertia at each drive depends on the platform position, the axes are coupled, and friction and the handled payload contribute additional torques. A rigid-body model describes the inertia, Coriolis and gravity terms, but does not always capture friction, payload-dependent effects or deviations in the assumed parameters. These remaining effects can be identified from measurements of the real machine. Identifying the complete dynamics from data instead would discard the physical knowledge that is already available and yield a model that is difficult to verify. This work retains the rigid-body model from [1] and identifies only the unmodeled dynamics, using sparse regression. This residual approach is compared with alternative combinations of regression target and model class.

Joint torques are reconstructed from measured motor currents, and the residual $\Delta\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{\text{meas}} - \boldsymbol{\tau}_{\text{nom}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$ is formed using measurement and the nominal rigid-body prediction. By design this residual contains everything the rigid-body model does not explain. It is approximated as a sparse linear combination $\Delta\boldsymbol{\tau} \approx \boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\xi}$ of candidate functions comprising velocity-dependent friction terms (viscous, smoothed Coulomb), configuration-dependent terms for gravity and inertia mismatch, and acceleration-proportional terms for payload and coupling effects, with $\boldsymbol{\xi}$ obtained by sparse regression [2, 3].

To separate the effect of the model formulation from that of the regression method, four models are identified by combining both choices: total torque or residual, and sparse regression or neural network. This gives a full sparse model, a full neural network, a residual neural network, and the residual sparse model. All four are fitted on excitation trajectories, tuned on a common validation set and evaluated on a structurally different, unseen test trajectory.

The residual sparse model achieves the lowest error on the unseen trajectory, reducing torque RMSE by 42% and MAE by 65% relative to the nominal model. More informative than the ranking is the structure of the result: the dominant factor is the regression target rather than the model class, with both residual formulations transferring better than either full-signal model. Retaining the nominal model means the identified part represents only the small, structurally simple remainder, while the nominal dynamics part continues to extrapolate where the learned part does not. The identified sparse residual model uses 34 active terms out of 60 candidates, against 5433 parameters in the residual network, and those terms are directly readable. This enables a direct physical plausibility check that is not available to the same extent for a black box model, and, it means the minimal model is extended rather than replaced. The intended application is model based feedforward

compensation through the command channel of the existing control [4]. The closed loop benefit of the presented identification is however yet to be proven.

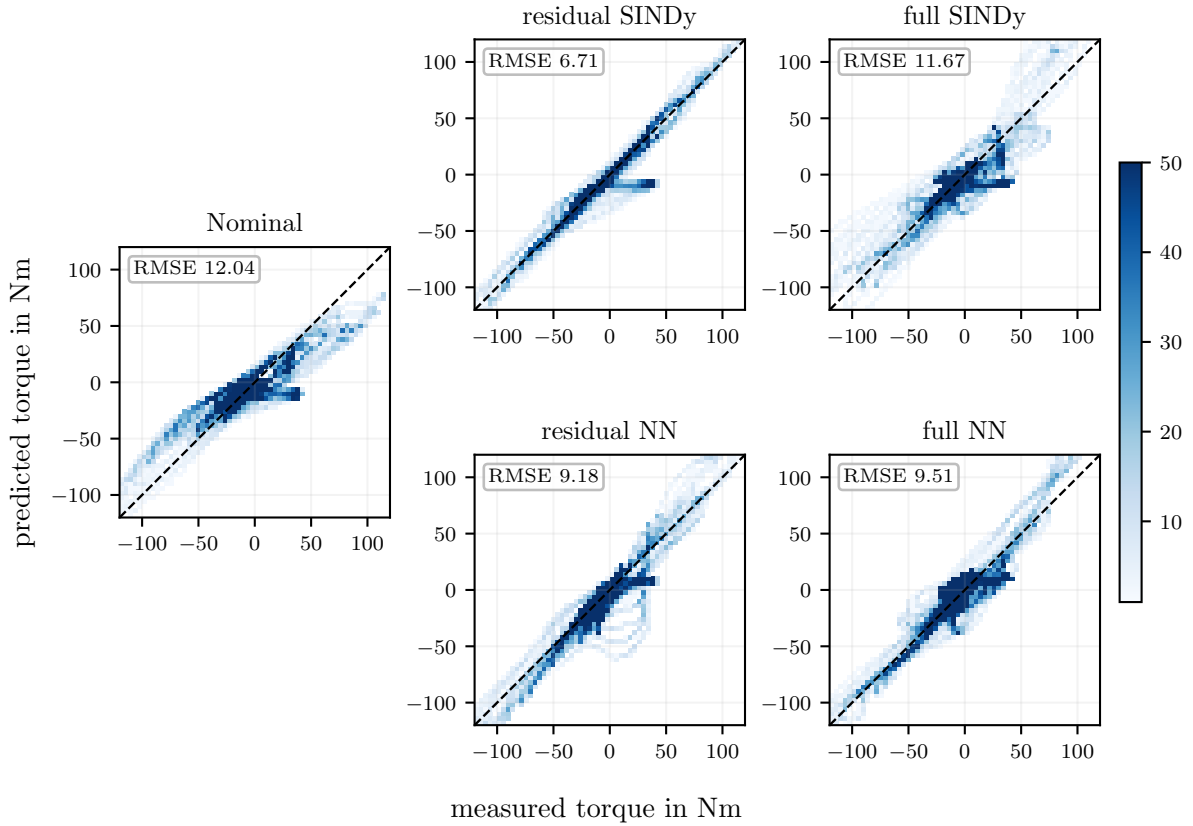


Figure 1: Parity of predicted versus measured joint torque for axis 1 on the held-out test program, with the dashed line indicating ideal agreement and all panels sharing identical binning and density scaling.

References

- [1] Asadi, F.; Heydari, A.: Analytical dynamic modeling of Delta robot with experimental verification. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, Vol. 234, No. 3, pp. 623–630, 2020. <http://dx.doi.org/10.1177/1464419320929160>
- [2] Brunton, S.L.; Proctor, J.L.; Kutz, J.N.: Discovering governing equations from data by sparse identification of nonlinear dynamical systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 113, No. 15, pp. 3932–3937, 2016. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1517384113>
- [3] Tibshirani, R.: Regression shrinkage and selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, Vol. 58, No. 1, pp. 267–288, 1996. <http://dx.doi.org/10.1111/j.2517-6161.1996.tb02080.x>
- [4] Pfeifer, D.; Baur, M.; Scheifele, C.; Fehr, J.: Dynamics-based Feedforward Control of CNC-controlled Robots using Digital Twins from Virtual Commissioning with Extended Dynamical Behavior. In *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, 2026. <https://doi.org/10.1109/SII64115.2026.11404707>

Autonomous Iterative Learning Control for Systems with Unknown Dynamics

Thomas Seel, Jan-Hendrik Ewering, Simon Ehlers, Michael Meindl

Institute of Mechatronic Systems, Leibniz University Hannover, An der Universität 1, 30823 Garbsen, Germany

E-mail: {jan-hendrik.ewering, simon.ehlers, michael.meindl, thomas.seel}@imes.uni-hannover.de

At the Institute of Mechatronic Systems at Leibniz University Hannover, we investigate how data-driven and AI-based methods can help overcome fundamental limitations of classical model-based approaches in system identification, sensor fusion, state estimation, and control. Many established estimators and controllers rely on sufficiently accurate model knowledge and carefully tuned parameters, while their performance may deteriorate under model uncertainty, changing operating conditions, or transfer to a different system. Our goal is therefore to develop learning-enabled methods that infer missing system knowledge from data and rapidly adapt to previously unknown dynamics and environmental conditions. The methodological spectrum ranges from physics-informed neural networks and fast non-autoregressive models for system identification to pluripotent sensor-fusion schemes and data-driven control algorithms. One concrete focus is the autonomous learning of repetitive motion tasks, where performance can be improved from trial to trial in a way that is reminiscent of human motor learning.

This talk provides an overview of recent research on autonomous iterative learning control for such repetitive reference-tracking tasks. Iterative Learning Control (ILC) is a well-established approach for improving tracking performance from trial to trial and is supported by a broad body of results on convergence, robustness, and high-performance tracking [1]. In practice, however, classical model-based ILC typically relies on prior model information and on learning parameters that must be selected and tuned for the system at hand, while data-driven control aims to reduce the dependence on explicit plant models [2].

One line of work combines iterative learning with data-driven modeling of unknown non-linear dynamics in Autonomous Iterative Motion Learning (AI-MOLE). AI-MOLE repeatedly applies an input trajectory, trains a Gaussian process model from experimental data, and uses the learned model to update the input trajectory until the desired tracking performance is achieved; the necessary learning parameters are determined automatically, enabling plug-and-play operation without manual parameter tuning [3]. Extensive experiments demonstrate this concept on different real-world robots and reference-tracking tasks using only input/output information when required.

Building on this idea, more recent work introduces Iterative Model Learning (IML) and Dual Iterative Learning Control (DILC) as a unified framework for data-driven ILC [4]. IML learns models of unknown dynamics from input/output trajectory pairs, while DILC combines model learning and control learning so that established model-based ILC methods can be employed without prior model information and with systematic self-parametrization. The latest extensions address multiple-input/multiple-output dynamics and show that autonomous tracking and model learning can be achieved without prior system knowledge or manual parameter tuning in complex robotic systems [5]. Related

work additionally considers constraint-aware motion adaptation and application-specific extensions of these learning control concepts.

The talk will place these developments along a continuum from classical model-based ILC to data-driven and increasingly self-configuring learning control. Particular attention will be given to the practical questions that determine whether such methods can be used beyond carefully tuned laboratory examples: the amount of prior knowledge required, the number of repetitions needed, the availability of formal convergence properties, and the transfer of the same learning mechanism between different systems and tasks. Application examples include different real-world robotic testbeds, multi-axis manipulators, and high-fidelity simulations of industrial robotic systems. The overall aim is to illustrate how repetitive mechatronic systems can learn accurate reference tracking from experimental data with progressively less commissioning and manual control-design effort.

- [1] D. A. Bristow, M. Tharayil, and A. G. Alleyne: A Survey of Iterative Learning Control: A Learning-Based Method for High-Performance Tracking Control. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(3), 96–114, 2006. doi: 10.1109/MCS.2006.1636313.
- [2] Z.-S. Hou and Z. Wang: From model-based control to data-driven control: Survey, classification and perspective. *Information Sciences*, 235, 3–35, 2013. doi: 10.1016/j.ins.2012.07.014.
- [3] M. Meindl, S. Bachhuber, and T. Seel: AI-MOLE: Autonomous Iterative Motion Learning for unknown nonlinear dynamics with extensive experimental validation. *Control Engineering Practice*, 145, 105879, 2024. doi: 10.1016/j.conengprac.2024.105879.
- [4] M. Meindl, S. Bachhuber, and T. Seel: Iterative Model Learning and Dual Iterative Learning Control: A Unified Framework for Data-Driven Iterative Learning Control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 70(12), 7818–7829, 2025. doi: 10.1109/TAC.2025.3577958.
- [5] J.-H. Ewering, A. Papa, S. F. G. Ehlers, T. Seel, and M. B. Meindl: Dual Iterative Learning Control for Multiple-Input Multiple-Output Dynamics with Validation in Robotic Systems. *arXiv:2509.18723*, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2509.18723.

Daten- und modellbasierte Schätzung nicht messbarer Größen in der Fahrzeugtechnik an drei Beispielen

S. Ehlers*, H. Schäfke*, D. Bank*, B. Volkmann*, T. Seel*

* Institut für Mechatronische Systeme, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 1,
30823 Garbsen, Tel.: +49 1523 762-0565, E-Mail: simon.ehlers@imes.uni-hannover.de

Viele für Regelung und Betriebsstrategie von elektrifizierten und automatisierten Fahrzeugen nötige Größen lassen sich mit Seriensensorik nicht genau genug messen, und bessere Sensorik scheitert an den Kostenvorgaben. Aus der Messaufgabe wird eine Modellierungs- und Schätzaufgabe. In diesem Beitrag werden drei Arbeiten auf unterschiedlichen Zeitskalen vorgestellt: die Schätzung der Radgeschwindigkeit im Millisekundenbereich, das prädiktive Energiemanagement eines Kühlauflegers über Stunden und die Schätzung von Fahrbahnzuständen, die sich über lange Zeiträume fortschreiben und zwischen Fahrzeugen teilen lassen. In allen drei Fällen wird die gesuchte Größe aus Seriensignalen erschlossen, einmal rein datengetrieben, einmal hybrid, einmal physikalisch strukturiert.

Raddrehzahlsensoren in Serienfahrzeugen liefern teils nur 43 Inkremente je Umdrehung, also 4 bis 5 cm je Inkrement. Unterhalb von 3 km/h bestimmen Quantisierung und Latenz den Fehler, sodass etwa die Ruckdämpfung auf einem unzuverlässigen Signal aufsetzt. In Elektrofahrzeugen liegt die Motordrehzahl hoch aufgelöst vor, wird aber durch Torsion und Spiel im Triebstrang verfälscht. Beide Fehleranteile sind last- und geschwindigkeitsabhängig, was eine echtzeitfähige analytische Beschreibung der Dynamik erschwert. In [1] wird daher ein rein datengetriebener virtueller Radsensor auf Basis eines GRU-Netzes vorgestellt, der Rad- und Motordrehzahl mit Antriebs- und Bremsmoment fusioniert (Abbildung 1). Auf Messdaten eines Volkswagen ID.7 wird so eine deutliche Verbesserung der Schätzgüte erreicht bei gleichzeitiger Einhaltung der Anforderungen an die Recheneffizienz auf einem Serien-Steuergerät.

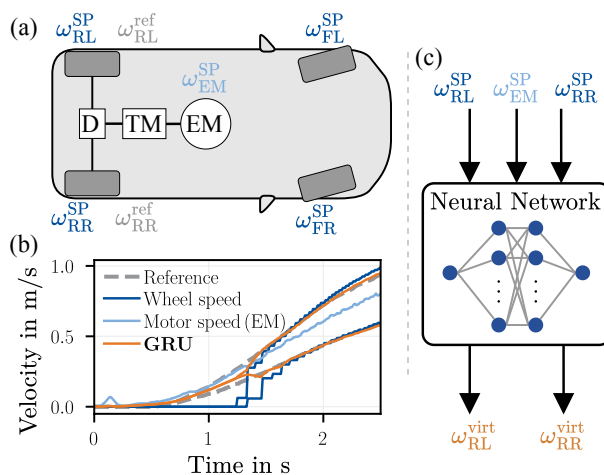


Abbildung 1: Virtueller Radsensor nach [1]: (a) verfügbare Drehzahlsignale, (b) Quantisierung und Torsionseinfluss bei kleinen Geschwindigkeiten, (c) GRU-Netzarchitektur.

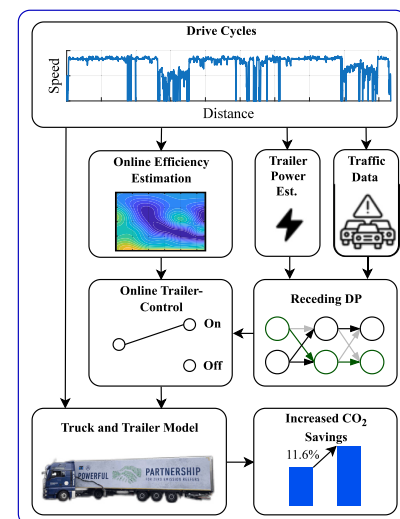


Abbildung 2: Prädiktives Energiemanagement nach [2]: Planer und Achsregler auf zwei Taktebenen.

Auf der Zeitskala von Stunden ersetzt eine batterieelektrische Kälteanlage mit Generatorachse den Hilfsdieselmotor des Kühlauflegers und erzeugt einen Zielkonflikt. Das zur Stromerzeugung nötige Schleppmoment kostet das Zugfahrzeug Kraftstoff, gleichzeitig muss die Batterie zur Sicherung der Kühltaste jederzeit ausreichend geladen sein. Da Streckenvorschau, Verkehrsfluss und Kühlbedarf nur ungenau bekannt sind, steht die Optimierung unter Prognoseunsicherheit. In [2] wird der Zielkonflikt zweistufig gelöst (Abbildung 2). Eine dynamische Programmierung mit gleitendem Horizont plant statt einer Ladezustandstrajektorie eine Schwelle für die Schleppeffizienz, also für das Verhältnis von erzeugter elektrischer Energie zu Mehrverbrauch. Diese Effizienz ist am Trailer nicht messbar. Ein physikalisches Fahrzeug- und Batteriemodell liefert die Datenbasis, ein Sparse Gaussian Process (SGP) schätzt sie online. Kalman-Filter prognostizieren Rekuperationspotenzial und Kühlbedarf, wobei letzterer die dynamische Untergrenze des Ladezustands festlegt. In 57 Betriebsstunden realer Transportfahrten sinken die CO₂-Emissionen gegenüber einer Zweipunktregelung im Mittel um 11,6 %, in NREL-Zyklen um 8,2 %.

Der witterungsbedingte Fahrbahnzustand entscheidet über den Bremsweg, zeigt sich im Fahrverhalten aber erst bei Schlupf. In [3] werden Fahrzeug- und Umgebungszustand deshalb in einem physikalisch strukturierten Bayes-Modell gemeinsam geschätzt. Die Umgebung ist eine Karte diskreter Fahrbahnabschnitte mit je einer Verteilung des maximalen Reibwerts. Ein Rao-Blackwell-Partikelfilter aktualisiert die Hyperparameter online, sodass die Information beim erneuten Befahren derselben Stelle wieder bereitsteht. In Notbremsungen auf drei Fahrbahntypen sinkt die Reibwertunsicherheit von Versuch zu Versuch. Der RMSE der Bremswegvorhersage fällt im Mittel um 4,95 %. Weil die Reibwertkarte ortsbezogen ist, lässt sie sich zwischen Fahrzeugen teilen. Im Ausblick geht es um Flotten, die ein Gebiet schneller erschließen und Reibwerte auch für nie befahrene Abschnitte prognostizieren. Für Nutzfahrzeuge liegt das nahe, da sie feste Routen wiederholt befahren. Dafür wären die aus Bordsensorik gewonnenen Schätzwerte [4] über Fahrzeugklassen hinweg zu normieren, eine Frage aus dem Projekt InFusion zur cloudbasierten Fahrbahnzustandsfusion.

Literatur

- [1] Schäfke, H. et al.: Neural Network-Based Virtual Wheel-Speed Sensor for Enhanced Low-Velocity State Estimation, IFAC-PapersOnLine, IFAC World Congress, 2026 (angenommen).
- [2] Bank, D. et al.: Decarbonizing Cold Chain Transport: Predictive Energy Management for Refrigerated Generator-Axle Trailers, Energy Conversion and Management: X, Vol. 31, 2026.
- [3] Volkmann, B. et al.: Joint Estimation of Vehicle States and Spatio-Temporal Tyre-Road Friction Using Sequential Monte Carlo, Vehicle System Dynamics, 2026.
- [4] Schäfke, H. et al.: Transformer Neural Networks for Maximum Friction Coefficient Estimation of Tire-Road Contact Using On-Board Vehicle Sensors, IEEE Conference on Decision and Control, 2023.

Modellierung und Identifikation der Karbonatisierung eines thermochemischen Speichers mit CO₂-Abscheidung

E. Röhm[†], E. Klockow[‡], M. Linder[‡], O. Sawodny[†]

[†]Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart, Waldburgstr. 19, 70563 Stuttgart, Tel: +49(0)711/68566960, E-Mail: emil.roehm@isys.uni-stuttgart.de

[‡]Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

Für das Erreichen der Treibhausgasneutralität müssen neben einer weitreichenden Emissionsreduktion auch verbleibende Emissionen durch natürliche oder technische Kohlenstoffsinken ausgeglichen werden. In einem aktuellen Szenario des Umweltbundesamts verbleiben in Deutschland im Jahr 2045 rund 41 Mio. t CO₂-Äquivalente, die durch zusätzliche technische Maßnahmen kompensiert werden müssen [1]. Verfahren zur Abscheidung von CO₂ aus der Umgebungsluft können daher einen wichtigen Beitrag zum Ausgleich schwer vermeidbarer Restemissionen leisten.

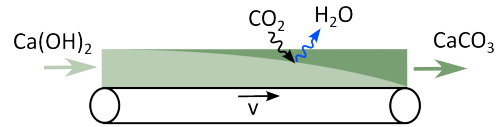
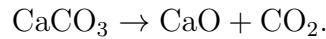
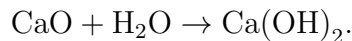


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Fließbandreaktors zur Karbonatisierung einer Ca(OH)₂-Schicht.

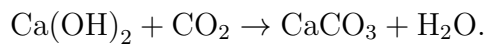
Dafür sind kalziumbasierte Stoffsysteme besonders interessant, da die Ausgangsmaterialien in großen Mengen verfügbar sind. Zusätzlich lässt sich die CO₂-Abscheidung mit der Speicherung von Energie und der Bereitstellung von Wärme verbinden. Die Aufladung des Energiespeichers erfolgt durch die Kalzinierung von Kalziumkarbonat unter Zufuhr von Energie,



Das dabei konzentriert freigesetzte CO₂ kann abgeschieden und einer dauerhaften Speicherung zugeführt werden. Durch die anschließende Hydratisierung von Kalziumoxid wird Wärme freigesetzt, die beispielsweise für Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung verwendet werden kann



Das entstandene Kalziumhydroxid bindet danach CO₂ aus der Umgebungsluft und wird wieder zu Kalziumkarbonat umgesetzt,



Damit entsteht ein zyklischer Prozess aus Kalzinierung, Hydratisierung und Karbonatisierung.

Für die Karbonatisierung wird ein Fließbandreaktor (siehe Abbildung 1) betrachtet. Eine poröse Ca(OH)₂-Schicht wird mit der Bandgeschwindigkeit $v(t)$ durch die CO₂-haltige Umgebungsluft transportiert. Die Koordinate x beschreibt die Transportrichtung entlang des Bands und z die Schichthöhenrichtung.

Mit den Zustandsgrößen $C_1(x, z, t)$ als CO₂-Konzentration und $C_2(x, z, t)$ als Ca(OH)₂-Anteil führt die Kombination aus Materialtransport, Diffusion und chemischer Reaktion zu einem nichtlinearen partiellen Differentialgleichungssystem der Form

$$\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial t} + v(t) \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial x} = \begin{bmatrix} D \Delta C_1 \\ 0 \end{bmatrix} - \mathbf{r}(\mathbf{C}), \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}.$$

Durch geeignete Vereinfachung lässt sich dies in ein Transportproblem in x -Richtung und ein Diffusionsvorgang mit Reaktion in z -Richtung aufteilen. Zur Beschreibung der Reaktion in der Schicht werden zwei verschiedene Modellansätze untersucht: Ein kinetisches Reaktions-Diffusions-Modell beschreibt den CO_2 -Transport innerhalb der Schicht und die lokale Reaktion mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Als recheneffiziente Alternative wird ein pseudoanalytisches Frontmodell betrachtet, das den Prozess durch eine fortschreitende Übergangszone zwischen karbonatisiertem und noch nicht karbonatisiertem Material beschreibt. Beide Modelle werden anhand von Versuchen mit unterschiedlichen Schichthöhen und CO_2 -Konzentrationen parametrisiert und verglichen. Zusätzlich wird untersucht, wie eindeutig die Modellparameter aus den verfügbaren Messdaten bestimmt werden können.

Insgesamt bilden die Modellierung und Identifizierbarkeitsanalyse die Grundlage für die spätere Regelung des Fließbandreaktors. Durch eine geeignete Anpassung der Bandgeschwindigkeit soll zukünftig trotz veränderlicher Prozessbedingungen ein vorgegebener Karbonatisierungsgrad am Reaktorausgang eingehalten und gleichzeitig der Materialdurchsatz maximiert werden.

Literatur

- [1] Umweltbundesamt: CARE - Pfade zu Treibhausgasneutralität und Negativemissionen, Dessau-Roßlau, 2026. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/szenarien-projektionen/care-pfade-zu-treibhausgasneutralitaet>

Ein universelles Modell zur Vorhersage der Filtrationsleistung von fasrigen Gasfiltermedien

Tobias Ertl†

†Institut für Technische und Numerische Mechanik
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart
Tel +49 711 68566388; E-Mail: tobi.ertl@t-online.de

Fasrige Filtermedien werden zur Abscheidung von Partikeln aus Gasströmen eingesetzt und bieten eine günstige Kombination aus Filtrationsleistung, Druckverlust, Staubspeicherkapazität und Herstellungskosten. Für die numerische Auslegung realer Filtermedien sind jedoch detaillierte Simulationen der vollständigen Faserstruktur mit erheblichem Rechenaufwand verbunden. Eine alternative Beschreibung basiert auf der Betrachtung einer einzelnen Faser und erlaubt dadurch eine deutlich effizientere Untersuchung grundlegender Zusammenhänge. Die verfügbaren analytischen und empirischen Modelle sind allerdings jeweils nur für eingeschränkte Parameterbereiche entwickelt worden. Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines universellen Modells zur Vorhersage der Filtrationsleistung eines fasrigen Filtermediums innerhalb eines möglichst breiten, einheitlich beschriebenen Parameterbereichs.

Ausgangspunkt ist die Betrachtung der drei für die Arbeit relevanten Abscheidemechanismen Diffusion, Interzeption und Impaktion. Diese werden getrennt untersucht und mithilfe der dimensionslosen Kennzahlen Interzeptionsparameter R , Péclet-Zahl Pe , Stokes-Zahl St und Packungsdichte α beschrieben. Der betrachtete Strömungsbereich ist auf laminare Stokes-Strömung mit $Re \leq 1$ beschränkt. Die Strömungsfelder einer periodisch angeordneten Einzelfaser werden mit GeoDict unter Verwendung des LIR-Algorithmus berechnet. Anschließend werden Partikelbahnen simuliert, wobei die einzelnen Abscheidemechanismen gezielt getrennt betrachtet werden. Für Interzeption und Impaktion kann die Effizienz über die Partikeltrajektorien bestimmt werden; die Diffusion wird mithilfe einer statistischen Auswertung einer größeren Anzahl stochastischer Partikelbahnen ermittelt.

Um den großen Parameterraum mit vertretbarem Rechenaufwand abzudecken, wird zunächst eine dimensionslose Beschreibung verwendet. Eine Kombination aus Latin-Hypercube-Sampling und anschließendem Rejection Sampling sorgt für eine annähernd gleichmäßige Verteilung der Simulationspunkte im Raum der dimensionslosen Kennzahlen. Dadurch reduziert sich der Aufwand auf insgesamt 10 710 Simulationen. Vor der eigentlichen Untersuchung werden außerdem die Voxelauflösung und die Länge der Simulationszelle anhand von Konvergenzuntersuchungen festgelegt. Die untersuchten physikalischen Größen umfassen unter anderem Packungsdichten von $10^{-3} \leq \alpha \leq 0.2$, Faserdurchmesser von $1 \mu\text{m}$ bis 0.1 mm und Partikeldurchmesser von $0.1 \mu\text{m}$ bis $10 \mu\text{m}$.

Auf Basis der Simulationsergebnisse werden bestehende Modelle aus der Literatur[1] verglichen und für die jeweiligen Abscheidemechanismen die Ansätze mit der geringsten Abweichung ausgewählt oder kombiniert. Für die Interzeption liefert das empirisch angepasste Modell von Lee und Liu [2] die geringsten Fehler. Bei der Diffusion erweist sich eine bereichsabhängige Kombination als vorteilhaft: Für $\alpha \leq 0.165$ wird das Modell von Kirsch und Chechuev [3] verwendet, für höhere Feststoffvolumenanteile das Modell von Lee und Liu [2]. Für die Impaktion stimmen die untersuchten klassischen Modelle deutlich schlechter mit den Simulationsergebnissen überein. Daher wird ein neues Sättigungsmodell mit analytischem Grenzwert und einem an die Simulationsdaten angepassten Parameter entwickelt. Dieses beschreibt die Impaktion im

relevanten Bereich deutlich besser als die betrachteten Literaturmodelle.

Die Kombination der Modelle für die drei Mechanismen beschreibt die simulierte Gesamtabscheideeffizienz über den betrachteten Parameterraum mit einem mittleren quadratischen Fehler von etwa $MSE = 0.0015$. Zur Validierung wird das entwickelte Modell anschließend auf vollständige Filtermedien angewendet und mit unabhängigen GeoDict-Simulationen verglichen. Für ein Filtermedium mit geringerer Filtrationsleistung zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung. Bei einem Medium mit höherer Leistung treten dagegen deutliche Abweichungen auf. Die Ursache wird in den Grenzen der Einzelfaserannahme gesehen: Mit steigender Packungsdichte, dünneren Fasern und größerer Schichtdicke gewinnen geometrische Effekte wie benachbarte Fasern, Überlagerungen und die Porenstruktur an Bedeutung. Die Ergebnisse zeigen damit, dass das entwickelte Modell insbesondere für eine erste Bewertung und für Parameterstudien geeignet ist, während für komplexe reale Medien weiterhin Einschränkungen bestehen.

Das entwickelte Modell ermöglicht eine wesentlich effizientere Untersuchung grundlegender Zusammenhänge als vollständige Filtermediensimulationen und erweitert bestehende Ansätze insbesondere um eine validierte Beschreibung der Diffusion sowie eine eigenständige Modellierung der Impaktion. Für weiterführende Untersuchungen sind insbesondere eine Glättung der Modellübergänge, die Berücksichtigung elektrostatischer Abscheidung und eine Sensitivitätsanalyse zur Übertragung der Einzelfasermodelle auf vollständige Filtermedien von Interesse.

Literatur

- [1] Abdolghader, P., Brochot, C., Haghighat, F., & Bahloul, A.; Airborne nanoparticles filtration performance of fibrous media: A review. *Science and Technology for the Built Environment*, 24(6), 648–772, 2018.
- [2] Lee, K. W.; Liu, B. Y. H.: Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters. *Aerosol Science and Technology*, 1(2), 147–161, 1982.
- [3] Kirsch, A. A.; Chechuev, P. V.: Diffusion deposition of aerosol in fibrous filters at intermediate Peclet numbers. *Aerosol Science and Technology*, 4(1), 11–16, 1985.

Modellierung der Rauheitsübertragung beim Dressierwalzen von verzinkten Stahlbändern mittels Verteilungsdichten der Oberflächenhöhen

N. Fischer†, A. Steinboeck†

†Christian Doppler Laboratory for Intelligent Process Control for High-Quality Steel Products, Automation and Control Institute (ACIN), TU Wien, Austria
e-mail: {fischer,steinboeck}@acin.tuwien.ac.at

Die Hauptziele des Dressierwalzens sind das Einstellen einer definierten Rauheit der Bandoberfläche sowie die Streckung und Verbesserung der Ebenheit des Metallbandes. Bei verzinkten Oberflächen von Stahlbändern ist der arithmetische Mittenrauwert R_a ein wesentliches Qualitätsmerkmal, das innerhalb enger Toleranzen liegen muss. Die Oberflächenrauheit beeinflusst maßgeblich die Haftung von Ölen und Beschichtungen sowie die Reibung in nachgelagerten Umformprozessen wie dem Tiefziehen. In einem Dressierwalzgerüst (Abb. 1a) wird die Walzkraft P über zwei Arbeitswalzen auf das Band aufgebracht, wobei zwei Stützwalzen der Durchbiegung der Arbeitswalzen entgegenwirken. Die Oberfläche der Arbeitswalzen ist definiert texturiert (z.B. durch funkenerosives Texturieren) und wird durch die verteilte Walzkraft in die weichere Zinkbeschichtung des Bandes eingeprägt (Abb. 1b). Die resultierende Oberflächentopografie hängt von der initialen Bandoberfläche, der Oberfläche der Arbeitswalze und dem Übertragungsverhalten zwischen diesen ab. Durch Verschleiß verändern die Arbeitswalzen ihre Oberflächeneigenschaften und müssen regelmäßig neu texturiert werden. Für die Regelung der Bandrauheit innerhalb enger Grenzen ist eine genaue Modellierung des Walzenverschleißes sowie des Rauheitsübertragungsverhaltens erforderlich.

Zur Quantifizierung der Rauheit werden aus dem Höhenprofil $z(y)$ aggregierte statistische Kenngrößen wie der arithmetische Mittenrauwert R_a ausgerechnet. Bestehende Modelle für Walzenverschleiß und Rauheitsübertragung verwenden entweder rechnerisch aufwendige Finite-Elemente-Methoden [1], die für Echtzeitanwendungen ungeeignet sind, oder einfacher implementierbare momentenbasierte Ansätze [2], die jedoch den Großteil der Oberflächeninformation verwerfen. Bestehenden Modelle können daher den betrachteten Rauheitsübertragungsprozess weder mit ausreichender Genauigkeit noch innerhalb der verfügbaren Rechenzeit abbilden.

In der vorliegenden Arbeit wird eine neue Modellierungsmethode der Rauheit von be-

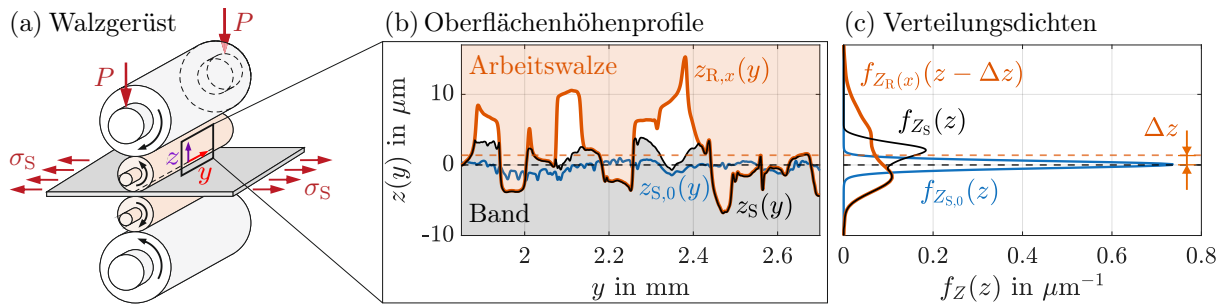


Abbildung 1: (a) Dressierwalzgerüst mit aufgebrachtter Walzkraft P und Bandzug σ_S ; (b) beispielhafte Oberflächenhöhenprofile der verschlissenen Arbeitswalze $z_{R,x}$, des ungewalzten Bandes $z_{S,0}$ und des gewalzten Bandes z_S ; (c) zugehörige Verteilungsdichten und Abstand zwischen der mittleren Walzen- und Bandoberfläche Δz .

schichteten Stahlbändern vorgestellt, bei der die wesentlichen Oberflächeninformationen in Form von Verteilungsdichten der Oberflächenhöhen erhalten bleiben. Die Oberflächenhöhen von Walze und Band werden als Zufallsvariablen Z_R und Z_S modelliert. Das Walzenverschleißmodell wird als nichtlineare Transformation $Z_R(x) = g_1(Z_{R,0}, x)$ formuliert, welche unter Berücksichtigung der bisher gewalzten Länge x die anfängliche Oberflächenhöhe $Z_{R,0}$ der Arbeitswalze auf ihre aktuelle Oberflächenhöhe $Z_R(x)$ abbildet. Eine zweite nichtlineare Transformation $Z_S = g_2(Z_{S,0}, Z_R(x), \Delta z)$ bildet die initiale Oberflächenhöhe $Z_{S,0}$ des Bandes auf dessen Oberflächenhöhe Z_S nach dem Walzen ab. Die Zufallsvariable $Z_{S,0}$ wird von der bekannten Zinkauflagemenge beeinflusst. Die Transformation g_2 hängt von der aktuellen Walzenoberflächen $Z_R(x)$ sowie dem Abstand Δz zwischen Walze und Bandoberfläche ab (siehe Abb. 1b). Die resultierenden Zufallsvariablen $Z_R(x)$ und Z_S werden jeweils durch die Verteilungsdichten $f_{Z_R(x)}(z)$ und $f_{Z_S}(z)$ charakterisiert (siehe Abb. 1c für die in Abb. 1b dargestellten Höhenprofile). Für die Modellidentifikation und Validierung werden diese Verteilungsdichten mit Messwerten verglichen.

Walzenverschleißmodell: Zur Entwicklung des Walzenverschleißmodells wurde die Verteilungsdichte $f_{Z_R(x)}(z)$ der Oberflächenhöhe von Arbeitswalzen bei definierten gewalzten Längen x wiederholt gemessen. Es wurden zwei für die Entwicklung von $f_{Z_R(x)}(z)$ relevante Mechanismen identifiziert: (a) Abrieb der Walzenoberfläche infolge des periodischen Kontakts mit der Stützwalze und (b) Zinkanhaftung an der Walzenoberfläche. Es wurde ein Walzenverschleißmodell entwickelt, das beide Mechanismen berücksichtigt, die Entwicklung von $f_{Z_R(x)}(z)$ als Funktion von x vorhersagt und gute Übereinstimmung mit Messdaten zeigt (siehe [3]).

Rauheitsübertragungsmodell: Die Übertragung der Oberflächentopografie der Arbeitswalze auf die Bandoberfläche hängt wesentlich vom lokalen Spannungszustand im Band ab während dieses von den Arbeitswalzen zusammengedrückt wird. Dieser Spannungszustand hängt von der Walzkraft P , dem Bandzug σ_S , der Banddicke, der Dehngrenze des Bandmaterials sowie den Reibungsbedingungen zwischen Band- und Walzenoberfläche ab. Mit zunehmender Walzkraft P dringt die Walzenoberfläche tiefer in die Bandoberfläche ein, sodass der Abstand Δz abnimmt. Dabei führt die plastische Verformung des Bandes dazu, dass Zink innerhalb der Beschichtung in Bereiche ohne Kontakt mit der Arbeitswalze fließt und dort Aufwölbungen bildet. Die resultierende bimodale Verteilungsdichte ist als schwarze Linie in Abb. 1c dargestellt. Mit dieser detaillierten statistischen Erfassung des Rauheitsübertragungsverhaltens erweitert das vorgestellte Modell den aktuellen Stand der Technik.

Literatur

- [1] Wu, C.; Zhang, L.; Qu, P.; Li, S.; Jiang, Z.; Li, W.: Surface texture transfer in skin-pass rolling with the effect of roll surface wear, *Wear*, Jg. 476, 203764, 2021.
- [2] Schulte, C.; Li, X.; Abel, D.; Gerhard, H.: Model-based control of the strip roughness in cold rolling, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 54, S. 109–114, 2021.
- [3] Fischer, N.; Kugi, A.; Steinboeck, A.: Empirical roll wear model to predict changes of the roll surface height distribution in a temper rolling process, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 59, S. 48–53, 2025.

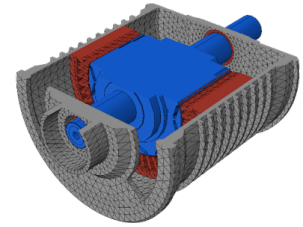
Port-Hamiltonian Modeling of a Synchronous Reluctance Machine for Structure-Preserving Model Reduction

Johannes Rettberg*, Jörg Fehr*, Nicolas Lüer*

* Institute of Engineering and Computational Mechanics, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, E-Mail: joerg.fehr@itm.uni-stuttgart.de

Electric motors are key components in industrial production and electrified powertrains. Their design involves competing objectives such as efficiency, power density, material use, acoustic behavior, and cost, creating a demand for simulation models that combine physical fidelity with computational efficiency. The synchronous reluctance machine (SynRM) considered here is a representative multiphysical system in which electromagnetic and mechanical dynamics are coupled through the air gap; see Figure 1.

Port-Hamiltonian (pH) systems provide an energy-based framework for coupled multiphysical systems. Energy storage, dissipation, and power transfer are represented explicitly, while physical subsystems are interconnected through power-conjugate variables, preserving important system-theoretic properties such as passivity.



For the SynRM, a modular pH model has been developed [2]. A three-dimensional finite-element model of the elastic mechanical components is coupled to a one-dimensional electromagnetic reluctance model through discrete interaction points at the air gap. A particular feature is the variable air gap: mechanical deformation changes the magnetic reluctance and therefore the electromagnetic energy which in turn affects the deformation of the air-gap. By incorporating the configuration-dependent reluctance directly into the Hamiltonian, electromagnetic forces and structural deformation arise consistently from the same energy formulation. Numerical simulations verify the expected energy balance and demonstrate the applicability of the approach to an engineering-scale multiphysical model. The resulting FE-based formulation is, however, high-dimensional. This creates a conflict between physical fidelity and the computational efficiency required for repeated simulation, optimization, and control-oriented applications. Moreover, conventional model order reduction (MOR) may destroy the energetic structure and passivity of the original pH system. Structure-preserving MOR is therefore not merely a computational acceleration, but an integral part of the modeling concept.

Abbildung 1:
Synchronous reluctance machine as a multiphysical benchmark coupling electromagnetic and mechanical dynamics; model geometry based on [1].

The modular formulation raises an additional methodological question: should the complete coupled model be reduced, or should the physical subsystems be reduced individually before interconnection? The latter retains the possibility of adapting the approximation space to the dynamics of each physical domain while maintaining an energy-consistent coupling, as illustrated in Figure 2. For the present SynRM demonstrator, first reduction studies focus on the mechanical subsystem using linear Krylov- and spectral-based approaches. Certified a-posteriori error bounds for reduced pH systems provide a systematic basis for assessing the approximation quality and, in future, for selecting suitable reduced dimensions before subsystem interconnection [3, 4].

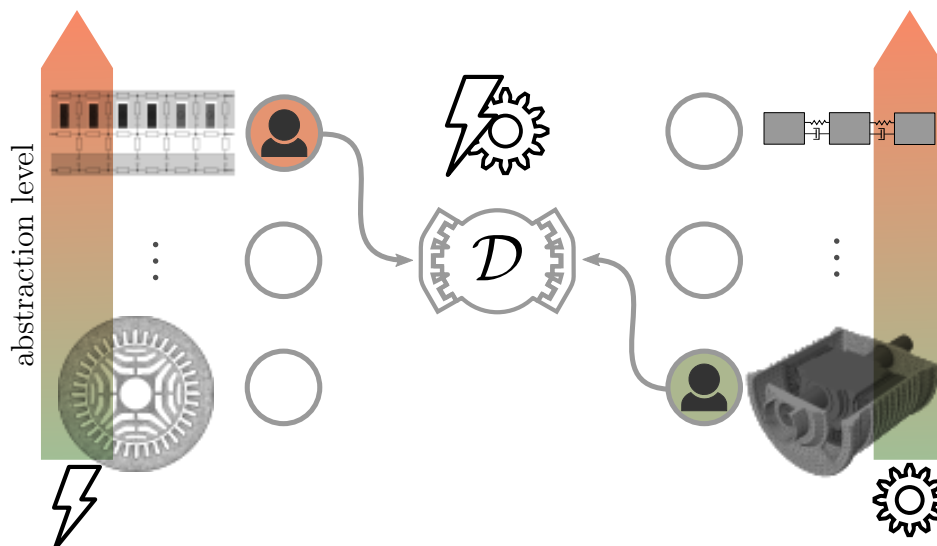


Abbildung 2: Modular port-Hamiltonian representation of the electromagnetic (left) and mechanical (right) SynRM subsystems. Their interconnection is power-conserving and preserves the overall energy balance.

The present demonstrator deliberately isolates the coupling problem: the rotor is treated as rigid and non-rotating, while the electromagnetic domain is represented by a simplified reluctance network. This allows the energy-consistent coupling, the influence of the variable air gap, and the consequences for structure-preserving reduction to be studied separately before extending the model towards rotor rotation and more detailed electromagnetic descriptions.

The SynRM thus serves as a representative engineering benchmark for combining energy-based multiphysics modeling with structure-preserving model reduction as a basis for efficient simulation and design optimization.

Acknowledgment: The authors gratefully acknowledge Jakob Seibert, Mario Hermle, Bernard Haasdonk and Sven Ullmann for their contributions and valuable discussions.

Literatur

- [1] Hermle, M.; Kesten, J.; Doppelbauer, M.; Eberhard, P.: Dynamic Modeling of a Synchronous Reluctance Machine for Transient Simulation of Vibrations under Variable Rotor Magnetization. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, Vol. 238, No. 1, pp. 52–63, 2024. doi: 10.1177/14644193241259984
- [2] Seibert, J.F.: Modular modeling and simulation of a synchronous reluctance machine in port-Hamiltonian representation. Master Thesis MSC-356, Institute of Engineering and Computational Mechanics, University of Stuttgart, 2025.
- [3] Rettberg, J.; Wittwar, D.; Buchfink, P.; Herkert, R.; Fehr, J.; Haasdonk, B.: Improved a posteriori error bounds for reduced port-Hamiltonian systems. Advances in Computational Mathematics, Vol. 50, No. 5, p. 100, 2024. doi: 10.1007/s10444-024-10195-8
- [4] Rettberg, J.: Data-driven Modeling and Certified Model Order Reduction of Port-Hamiltonian Systems. Dissertation, Schriften aus dem Institut für Technische und Numerische Mechanik der Universität Stuttgart, (submitted) Aachen: Shaker Verlag, 2026.

Datengetriebene iterative Methode zur Modellreduktion bilinearer Systeme

J. Lilienblum[†], I. V. Gosea[†], P. Benner[†]

[†]Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, Sandtorstraße 1, 39106 Magdeburg, Tel: ++49(0)391-6110806, E-Mail: {lilienblum, gosea, benner}@mpi-magdeburg.mpg.de

Moderne numerische Verfahren beinhalten in der Regel die Berechnung großskaliger dynamischer Systeme, die schnell und zuverlässig erfolgen muss. Hierfür wird bevorzugt die Theorie der Modellordnungsreduktion (MOR) ausgenutzt. Viele Klassen nichtlinearer Systeme mit analytischen Nichtlinearitäten können dabei gut durch bilineare Systeme approximiert werden. Diese Systeme verbinden direkt die inneren Zustände $\mathbf{x}(t)$ mit der Eingabegröße $\mathbf{u}(t)$. Im Fall eines Single-input Single-output (SISO)-bilinearen Systems ergibt sich folgende Darstellung:

$$\Sigma_B : \begin{cases} \mathbf{E}\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{N}\mathbf{x}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), & \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), \end{cases}$$

wobei $\mathbf{E}, \mathbf{A}, \mathbf{N} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ mit $\mathbf{E}$ als regulärer Matrix, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ und $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$. Die Eingabe ist gegeben durch $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}$ und die Ausgabe durch $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}$ für $t > 0$. Dabei lassen sich Modellreduktionsmethoden in projektionsbasierte Ansätze und datengestützte Methoden einteilen. Letztere umfassen beispielsweise Loewner-Matrix-Algorithmen, die eine gute Alternative zu projektionsbasierten Methoden darstellen. Im Loewner-Ansatz werden die reduzierten Systemmatrizen durch Auswertung von Funktionswerten der Übertragungsfunktion berechnet an gewissen Interpolationspunkten berechnet, wobei dieser Ansatz in [1] eingeführt wurde. Für unseren Ansatz verwenden wir Übertragungsfunktionen verschiedener Ordnungen im Frequenzbereich:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_1(s_1) &= \mathbf{C} (s_1 \mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \\ \mathbf{H}_2(s_1, s_2) &= \mathbf{C} (s_2 \mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{N} (s_1 \mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \\ \mathbf{H}_3(s_1, s_2, s_3) &= \mathbf{C} (s_3 \mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{N} (s_2 \mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{N} (s_1 \mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \end{aligned}$$

Dabei spielt der Iterative Rationale Krylov-Algorithmus (IRKA) eine zentrale Rolle, da er den iterativen Faktor mit einbezieht. Damit steht eine Methode zur Berechnung der reduzierten Matrizen auf projektionsbasierter Weise zur Verfügung [2]. Dieser Algorithmus wurde mit dem Loewner-Ansatz im TF-(Transfer function)-IRKA-Verfahren für LTI-Systeme verknüpft [3]. Darüber hinaus wurde IRKA ebenfalls auf bilineare Systeme angewandt, wobei der B-(bilineare)-IRKA-Algorithmus in [4] entwickelt wurde. Ziel ist es, eine neuartige Methode zur Verbindung dieser Varianten zu entwickeln. Daher wird dieser Algorithmus als Transferfunktionsbasiertes Bilineares Iteratives Rationales Krylov-Verfahren (TF-BIRKA) bezeichnet. Als Ausgangspunkt werden dabei die zugrundeliegenden Sylvester-Gleichungen verwendet, um die reduzierten Matrizen (die sogenannten erweiterten oder verallgemeinerten Loewner-Matrizen) ausschließlich auf Basis von Proben der Übertragungsfunktionen verschiedener Ordnungen zu konstruieren.

Die entsprechenden Sylvester-Gleichungen für die Erreichbarkeits- bzw. Beobachtbarkeits-

gramsche können folgendermaßen formuliert werden:

$$\begin{aligned}\mathbf{AV} + \mathbf{VA}^T + \mathbf{NVN}^T + \mathbf{BB}^T &= \mathbf{0} \\ \mathbf{A}^T\mathbf{W} + \mathbf{WA} + \mathbf{N}^T\mathbf{WN} + \mathbf{C}^T\mathbf{C} &= \mathbf{0}.\end{aligned}$$

Diese Gleichungen können in eine kaskadierte Form zerlegt werden. Das Einbeziehen unterschiedlich vieler der Teilgleichungen wird später zu unterschiedlichen Genauigkeitsstufen führen. Insgesamt erfolgt die Berechnung der reduzierten Matrizen im folgenden Schema:

$$\mathbb{L} = \mathbf{W}^T\mathbf{V}, \quad \mathbb{L}_s = \mathbf{W}^T\mathbf{AV}, \quad \mathbb{U} = \mathbf{W}^T\mathbf{B}, \quad \mathbb{S} = \mathbf{CV}, \quad \mathbb{T} = \mathbf{W}^T\mathbf{NV}.$$

Nun können die Projektionsmatrizen bis zu unterschiedlichen Genauigkeitsstufen aufaddiert werden, was den (h,l)-TF-BIRKA-Reduktionsansatz ergibt:

$$\mathbf{W} := \mathbf{W}^{(h)} = \mathbf{W}_1 + \dots + \mathbf{W}_h \text{ and } \mathbf{V} := \mathbf{V}^{(l)} = \mathbf{V}_1 + \dots + \mathbf{V}_l \text{ for } h, l \in \{1, 2\}.$$

Dies führt im (1, 2)-TF-BIRKA-Ansatz zu folgender Berechnung der Einträge der reduzierten Matrizen für $\mathbf{E}$ und $\mathbf{A}$:

$$\begin{aligned}(\mathbb{L}^{(1,2)})_{ij} &= \hat{c}_i \frac{\mathbf{H}_1(\lambda_i) - \mathbf{H}_1(\lambda_j)}{\lambda_i - \lambda_j} \hat{b}_j + \hat{c}_i \sum_{k=1}^r \frac{\mathbf{H}_2(\lambda_k, \lambda_i) - \mathbf{H}_2(\lambda_k, \lambda_j)}{\lambda_i - \lambda_j} \hat{b}_k \hat{N}_{jk} \\ (\mathbb{L}_s^{(1,2)})_{ij} &= \hat{c}_i \frac{\lambda_i \mathbf{H}_1(\lambda_i) - \lambda_j \mathbf{H}_1(\lambda_j)}{\lambda_i - \lambda_j} \hat{b}_j + \hat{c}_i \sum_{k=1}^r \frac{\lambda_i \mathbf{H}_2(\lambda_k, \lambda_i) - \lambda_j \mathbf{H}_2(\lambda_k, \lambda_j)}{\lambda_i - \lambda_j} \hat{b}_k \hat{N}_{jk}.\end{aligned}$$

Abschließend werden die Methoden anhand mehrerer Kriterien wie der Konvergenz der Interpolationspunkte und der Qualität der Approximationen verglichen. Dazu wurden $\mathcal{H}_2$ -Normen der Fehlersysteme berechnet (unter Verwendung des M.E.S.S.-Toolbox¹).

Literatur

- [1] Mayo, A. J.; Antoulas, A. C.: A framework for the solution of the generalized realization problem. *Linear Algebra and its Applications*, 425(2):634–662, 2007. Special Issue in honor of Paul Fuhrmann.
- [2] Gugercin, S.; Antoulas, A. C.; Beattie, C. A.: $\mathcal{H}_2$ Model Reduction for Large-Scale Linear Dynamical Systems. *SIAMMatrix*, 30(2):609–638, 2008.
- [3] Beattie, C. A.; Gugercin, S.: Realization-independent $\mathcal{H}_2$ -approximation. In *51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 4953–4958, 2012.
- [4] Benner, P.; Breiten, T.: Interpolation-based $\mathcal{H}_2$ -model reduction of bilinear control systems. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, 33(3):859–885, 2012.

¹<https://www.mpi-magdeburg.mpg.de/projects/mess>

Datengetriebene Modellierung und Schätzung der Strahlpositionsdrift in Elektronenstrahlsystemen

K. Schrom†, A. Deutschmann-Olek†, A. Kugi†

†Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN), Technische Universität Wien,
Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien, E-Mail: katharina.schrom@tuwien.ac.at

Elektronenstrahlsysteme (ESS) bilden die Grundlage für Elektronenstrahlmikroskopie und Elektronenstrahlolithografie - zwei Schlüsseltechnologien der modernen Halbleiterfertigung. Die Genauigkeit der Strahlposition in diesen Systemen wird durch verschiedene Faktoren beeinträchtigt, wie beispielsweise thermische Ausdehnung, Verformungen infolge von Änderungen des Umgebungsdrucks oder Driftvorgängen in elektronischen Bauteilen. Bei geladenen Teilchenstrahlen stellen elektrostatische Aufladungseffekte einen zusätzlichen Einflussfaktor dar. Infolgedessen weicht die Strahlposition im Laufe der Zeit zunehmend von der Sollposition ab.

Moderne Fertigungsmethoden wie EUV-Technologien für Leading-Edge Prozessknoten stellen extrem hohe Anforderungen an die Präzision der Strahlpositionierung. Elektronenstrahlbasierte Maskenschreiber für diese Technologien erfordern eine Strahlpositionierungsgenauigkeit im Subnanometerbereich. Aktuelle Ansätze zur Kompensation des Strahldrifts basieren auf offline kalibrierten klassischen Strahldriftmodellen. Verbleibende Positionsabweichungen werden durch periodische Strahlkalibrierungsvorgänge korrigiert. Aufgrund der Komplexität und steigenden Anforderungen lassen sich viele Effekte jedoch nur schwer allein mit First-Principles-Modellen vorhersagen.

Dieser Beitrag präsentiert daher verschiedene datengestützte Ansätze zur Modellierung und Schätzung von Strahlpositionsdrift in ESS. Aufbauend auf einem bestehenden Strahldriftmodell wird dieses in der vorliegenden Arbeit um ein multilineares, datengetriebenes Modell erweitert, welches messtechnisch erfasste Einflussfaktoren in die Prädiktion einbeziehen kann. Diese Einflussfaktoren werden experimentell identifiziert und mithilfe einer Hauptkomponentenanalyse [1, 2] zu einem niedrigdimensionalen Eingangsvektor zusammengefasst. Darüber hinaus stellen wir eine auf Gauß-Prozessen [3] basierende Methode vor, um bisher unbekannte Nichtlinearitäten in der Dynamik von Aufladungseffekten zu modellieren. In diesem hybriden Ansatz kombinieren wir A-priori-Wissen mit maschinellem Lernen, um über aktuelle Modellansätze hinauszugehen und gleichzeitig die Interpretierbarkeit der Modellparameter zu bewahren sowie die Stabilität des identifizierten Modells zu garantieren.

Ausgehend von dem erweiterten Strahldriftmodell wird ein auf einem Kalman-Filter basierender Schätzer entwickelt, der sich adaptiv an Parameterdrift anpasst und einen sicheren Online-Betrieb ermöglicht. Der entwickelte Schätzer verhindert sog. Kovarianz-Windup [4], fördert die Sparsität der geschätzten Parameter [5] und ermöglicht die Berücksichtigung von Ungleichheitsbeschränkungen [6]. Der resultierende Algorithmus wird anhand von Messdaten aus einem industriellen Maskenschreiber validiert. Dabei zeigt sich eine verbesserte Schätzung der Strahldrift im Vergleich zu aktuellen Ansätzen.

Literatur

- [1] Greenacre, M., Groenen; P.J.F.; Hastie, T.; D’Enza, A.I.; Markos, A.; Tuzhilina, E.: Principal component analysis. *Nature Reviews Methods Primers*, Band 2(1), 1–21, 2022.
- [2] Brunton, S.L; Kutz, J.N.: *Data-Driven Science and Engineering: Machine Learning, Dynamical Systems, and Control*, Cambridge University Press, Cambridge, England, 2019.
- [3] Rasmussen, C. E.; Williams, C. K. I.: *Gaussian Processes for Machine Learning*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2005.
- [4] Cao, L.; Schwartz, H.M.: Analysis of the Kalman filter based estimation algorithm: An orthogonal decomposition approach. *Automatica*, Band 40(1), 5–19, 2004.
- [5] Farahmand, S.; Giannakis, G.B.; Leus, G.; Tian, Z.: Tracking target signal strengths on a grid using sparsity. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Band 2014(1), 7, 2014.
- [6] Simon, D.: *Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2006.

Posenschätzung für ein supraleiter-basiertes Schwebemodul

F. Geuss*, O. Sawodny

Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart, Waldburgstr. 19, 70563 Stuttgart

*Tel: +49 711 / 685-66309, E-Mail: ferdinand.geuss@isys.uni-stuttgart.de

Supraleiterbasierte magnetische Schwebesysteme nutzen den Flux-Pinning-Effekt in Typ-II-Supraleitern, um Permanentmagnete passiv und stabil in der Schwebelage zu halten. Im Gegensatz zu konventionellen elektromagnetischen Schwebesystemen wird – abgesehen von der Kühlung des Supraleiters – nahezu keine Energie benötigt, um den Schwebezustand aufrechtzuerhalten. Daher stellt supraleiterbasiertes Schweben eine vielversprechende Technologie für energieeffiziente berührungslose Transport- und Positioniersysteme dar.

Das betrachtete Schwebemodul wird durch einen entlang der Hochachse magnetisierten zylindrischen Permanentmagneten in der Schwebelage gehalten. Das Magnetfeld dieses Zylindermagneten ist rotationssymmetrisch, sodass das Schwebemodul nahezu kraftlos um die Hochachse gedreht werden kann, da keine Haltemomente des Supraleiters überwunden werden müssen. Durch Wechselwirkungen zwischen stationären elektromagnetischen Spulen mit im Schwebemodul integrierten Permanentmagneten können zudem Kräfte und Momente auf das Schwebemodul ausgeübt werden [1]. Dadurch werden sowohl die Kompensation äußerer Störungen als auch eine gezielte Positionierung des Schwebemoduls ermöglicht. Für eine solche Regelaufgabe wird die exakte Pose des Schwebemoduls benötigt, sodass ein präziser Posenschätzer von zentraler Bedeutung ist.

Basierend auf Messwerten des Magnetfelds mittels stationären Hall-Effekt-Sensoren wird die Pose des Schwebemoduls mithilfe eines Unscented Kalman Filter (UKF) [2] bestimmt. Bei einem UKF werden Prädiktion und Korrektur durchgeführt, indem eine Verteilung von Sigma-Punkten um die jeweils letzte Zustandsschätzung durch das nichtlineare Systembeziehungsweise Beobachtungsmodell propagiert wird.

Das dafür verwendete Systemmodell besteht aus einem vereinfachten Starrkörpermodell, das neben den elektromagnetischen Kräften und Momenten als Stellgrößen primär die Wechselwirkungen zwischen Supraleiter und Permanentmagnet berücksichtigt. Diese Wechselwirkungen werden durch eine gekoppelte nichtlineare Feder modelliert. Bei Drehungen um die Hochachse treten keine rückstellenden Kräfte oder Momente durch den Supraleiter auf. Die Bewegung wird jedoch durch Wirbelströme gedämpft, die in den Spulen und im Unterbau induziert werden. Die nichtlinearen Federkennlinien sowie das Bremsmoment werden experimentell bestimmt.

Zusätzlich müssen für eine präzise Posenschätzung die exakten Positionen und Orientierungen aller Hall-Effekt-Sensoren bekannt sein. Diese werden mittels nichtlinearer Optimierung auf Basis von Kalibrierungsmessungen, bei denen das Schwebemodul von außen präzise ausgelenkt wird, bestimmt.

Danksagung

Die Autoren danken der Festo SE & Co. KG für die finanzielle Unterstützung dieser Forschungsarbeit.

Literatur

- [1] Stammhammer M, Romdhane O, Schöttner M, Sawodny O. Semi-Analytical Lorentz Actuator Model for a Superconductor-Based 6-Degrees-of-Freedom Levitation System Exploiting Magnetization Periodicity. J Dyn Sys, Meas, Control. 2025;148(031010). doi:10.1115/1.4070590
- [2] Cichon D, Psiuk R, Brauer H, Töpfer H. A Hall-Sensor-Based Localization Method With Six Degrees of Freedom Using Unscented Kalman Filter. IEEE Sensors Journal. 2019;19(7):2509-2516. doi:10.1109/JSEN.2018.2887299

Adaptive Parameter Tuning of PID Controllers using Structured H_∞ -Synthesis

P. Breitschwerdt, J. Gesell, D. Leprich, J. Fehr

Institute of Engineering and Computational Mechanics, University of Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart, Germany, Tel: +49 (0)711 685 66554, E-Mail: pbreitschwerdt@icloud.com, jakob.gesell@itm.uni-stuttgart.de, david.leprich@itm.uni-stuttgart.de, joerg.fehr@itm.uni-stuttgart.de

In industrial automation, mechatronic systems like industrial robots and electrical drives are frequently supplied with predefined controller architectures, which are strictly dictated by the robot control unit. These controllers are typically pre-tuned by the manufacturer for one specific, nominal operating point. However, when these systems have to fulfill dynamic tasks with changing physical conditions, the standard controllers often fail to deliver optimal results, as the assumption of a single nominal operating point is no longer valid. The physical mismatch forces the standard controller into a continuous state of overcompensation, resulting in high-frequency oscillations in the control signal, aggressive torque chattering, imprecise trajectory tracking, increased energy consumption, and accelerated mechanical wear.

Adapting the controller to specific application needs is particularly challenging because the internal architecture of most industrial servo drives cannot be structurally modified. Given the constraints of existing hardware, structured H_∞ -synthesis emerges as a highly suitable approach to address this limitation [1], as it allows the direct optimization of predefined controller parameters without requiring full access to the control loop structure. The methodology is applied to a cascaded control loop, a structure commonly implemented in industrial robot controllers. The control objectives are formulated as a mixed-sensitivity problem in the frequency domain. By applying weights to the sensitivity and complementary sensitivity functions, the design enforces steady-state accuracy, ensures fast reference tracking, and suppresses high-frequency measurement noise [2].

To handle the parameter uncertainty introduced by varying physical loads, an interval-based adaptive control strategy is developed [3]. The continuous range of possible inertias is discretized into overlapping logarithmic intervals (see Figure 1). For each interval, a dedicated robust controller is synthesized offline using the `hinfstruct` command from the MATLAB Robust Control Toolbox [4]. This approach ensures that, regardless of the physical load, a stabilizing and highly optimized parameter set is calculated in an offline phase, which is then available for the current operating condition in the online phase.

The methodology is validated on a single-joint permanent magnet synchronous motor test system, where inertia is systematically varied by mounting metal disks directly onto the spindle. A digital twin architecture-combining TwinCAT [5] for real-time control and Virtuos [6] for process monitoring-injects the offline-calculated parameters into the servo drive via Servo over EtherCAT. Finally, the synthesized interval-based controllers are compared against the factory-default standard.

The results confirm the superiority of the structured H_∞ -synthesis approach, particularly under challenging dynamic conditions such as abrupt position steps. Under maximum load conditions during such large step-wise position commands, the standard controller

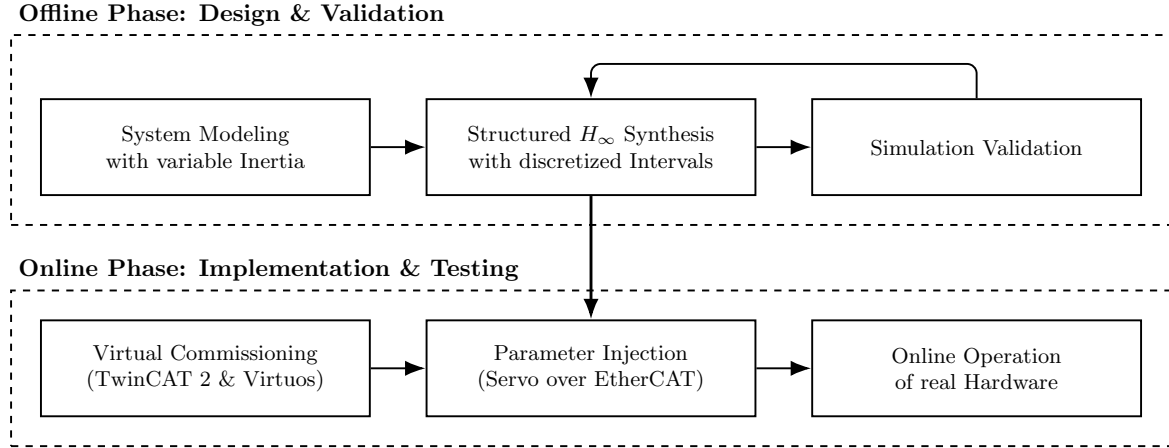


Figure 1: Schematic overview of the proposed methodology.

exhibits severe oscillations upon braking and fails to reach the target position precisely, resulting in a steady-state error of approximately 10.69° . In contrast, the synthesized controllers maintain high trajectory precision and stable settling behavior across all load cases, reducing the torque Integral Squared Error (ISE) by approximately 80% compared to the standard controller. Ultimately, structured H_∞ -synthesis proves to be a highly effective tool for optimizing industrial control systems with fixed structural constraints. By pre-calculating robust parameter sets for discrete operational intervals, control performance and hardware lifespan can be substantially improved, offering immediately accessible potential for optimizing complex manufacturing processes in modern industrial environments.

References

- [1] P. Apkarian and D. Noll, “Nonsmooth H_∞ Synthesis,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 51, no. 1, pp. 71–86, 2006. doi: 10.1109/TAC.2005.860290.
- [2] S. Skogestad and I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2005.
- [3] P. Breitschwerdt, “Adaptive Regelparametrierung von PID-Reglern mittels strukturierter H_∞ -Synthese,” Bachelor Thesis No. BSC-186, Institute of Engineering and Computational Mechanics (ITM), University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, Feb. 2026.
- [4] MathWorks, “hinfstruct - H_∞ tuning of fixed-structure controllers - MATLAB documentation,” 2025. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/robust/ref/hinfstruct.html>. [Accessed: Aug. 12, 2026].
- [5] Beckhoff Automation, “TwinCAT 2 Information System,” 2025. [Online]. Available: <https://infosys.beckhoff.com>. [Accessed: Aug. 12, 2026].
- [6] C. Scheifele, D. Scheifele, U. Eger, C. Daniel, E. Buchal, and S. Röck, “ISG-virtuos – der Digitale Zwilling für die Praxis,” in *Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2024, pp. 61–74. doi: 10.1007/978-3-662-66217-5.

Maschinelles Lernen Dynamischer Systeme aus Observablen

K. Janik[†], A. Othmane[‡], S. Yıldız^{*}, P. Benner[#]

[†]Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme Magdeburg, Sandtorstraße 1, 39114 Magdeburg, Tel: ++49(0)391/16110387, E-Mail: janik@mpi-magdeburg.mpg.de

[‡]Modellierung und Simulation technischer Systeme, Campus, Gebäude A 51, 66123 Saarbrücken, Tel: ++49(0)681/3023766, E-Mail: amine.othmane@uni-saarland.de

^{*}Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme Magdeburg, Sandtorstraße 1, 39114 Magdeburg, Tel: ++49(0)391/16110364, E-Mail: yildiz@mpi-magdeburg.mpg.de

[#]Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme Magdeburg, Sandtorstraße 1, 39114 Magdeburg, Tel: ++49(0)391/16110450, E-Mail: benner@mpi-magdeburg.mpg.de

Wissenschaftliches maschinelles Lernen von dynamischen Systemen der Form

$$\Sigma : \quad \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}) \quad \text{and} \quad y = g(\mathbf{x}) \quad (1)$$

stellt ein immer wichtigeres Werkzeug in Regelungstechnik und Kontrolltheorie dar. Der Einfachheit halber betrachten wir nur autonome Systeme ohne Eingang. Etablierten Methoden [1] lernen dabei meist im Zustandsraum. Allerdings stehen Messungen des gesamten Zustands $\mathbf{x}$ nur in seltenen Fällen zur Verfügung. In realen Experimenten sind meist weder die Zustände $\mathbf{x}$ noch die rechte Seite f noch die Abbildung g , die beschreibt, wie sich die Observablen aus den Zuständen ergeben, bekannt, sondern lediglich Messungen der Observablen y . Die Frage, ob Informationen über das Verhalten des Ausgangs hinreichend sind, um die Zustände zu rekonstruieren, führt zum Konzept der nichtlinearen Beobachtbarkeit [2, 3, 4]. Für hinreichend expressive Observablen y gibt es eine endliche Anzahl k an Zeitableitungen, aus denen der Zustand $\mathbf{x}$ rekonstruiert werden kann, das heißt $\mathbf{x} = \Phi(\mathbf{y})$, $\mathbf{y} = (y, \dot{y}, \dots, y^{(k)})$ [3, 4].

Da aber in der Regel Ableitungen der Observablen nicht gemessen werden können, müssen diese geschätzt werden. In Anwesenheit von Rauschen und anderen Messfehlern stellt die numerische Berechnung von Ableitungen ein schlecht gestelltes inverses Problem dar. Klassische finite Differenzen liefern in diesem Fall keine geeigneten Approximationen. Deshalb greifen wir auf algebraische Ableitungsschätzer [5, 6] zurück und erhalten neben den Ableitungen auch eine Glättung der Messdaten der Observablen y .

Damit stellt sich die Frage, wie viele Ableitungen notwendig sind, um den Zustand eindeutig aus den Observablen zu rekonstruieren. Um diese Zahl allein aus Messungen der Observablen zu bestimmen, wird eine zeitkontinuierliche Version des Falsche Nächste Nachbarn (FNN) Algorithmus [7] entwickelt. Da es möglich ist, dass die Dimension des Raums der Observablen und ihrer Ableitungen, die notwendig sind, um den Zustand zu rekonstruieren $k + 1$, größer ist als die tatsächliche Dimension des Zustandsraums d , kann in solchen Fällen ein Autoencoders angewandt werden, um die Dynamik in einem Raum mit geringerer Dimension zu lernen. Die Dimension des Zustandsraums entspricht der Dimension der Mannigfaltigkeit, auf der sich die Trajektorien im Raum der Observablen und ihrer Ableitungen befinden. Daher können wir sie mithilfe unterschiedlicher Algorithmen zur Identifikation der intrinsischen Dimension von Mannigfaltigkeiten schätzen [8, 9].

Mit Kenntnis über die Anzahl der Zeitableitungen k und der Zustandsdimension d können wir einen Autoencoder $\Psi = \mathcal{D} \circ \mathcal{E}$ parametrisieren, der zwischen Zustandsraum und dem Raum der Observablen und ihren Ableitungen abbilden soll, das heißt $\mathbf{x} \approx \mathcal{E}(\mathbf{y})$, $\mathbf{y} \approx \mathcal{D}(\mathbf{x})$. Durch die so gewonnene Approximation des Zustandsraums können wir ein weiteres neuronales Netzwerk verwenden, um dort die Dynamik zu lernen. Wir vergleichen

Kombinationen aus unterschiedlichen Architekturtypen für beide neuronale Netze anhand numerischer Beispiele und diskutieren, wann spezielle Architekturen von Vorteil sein können.

Weiterhin diskutieren wir die Möglichkeit, symmetrie- oder strukturerhaltende Methoden in unser methodologisches Gerüst zu implementieren und illustrieren dies, indem wir die symplektische Struktur des Zustandsraums Hamiltonischer Systeme berücksichtigen. Dies erlaubt es, a priori bekanntes Wissen, wie zum Beispiel, wenn es sich bei (1) um ein Hamiltonisches System handelt, mit in das Lernen einfließen zu lassen und von strukturerhaltenden Algorithmen wie [10] zu profitieren. Wir schenken dieser Anwendung besondere Beachtung, da Symmetrien und andere strukturelle Eigenschaften, etwa die symplektische Struktur des Zustandsraums Hamiltonscher Systeme, häufig nur in geeignet gewählten Zustandskoordinaten eine einfache oder kanonische Darstellung besitzen. Da gemessene Ausgangsgrößen im Allgemeinen nicht in solchen Koordinaten vorliegen, unterstreicht dies die Bedeutung einer datengetriebenen Rekonstruktion geeigneter Zustandskoordinaten aus Ausgangsgrößen.

Literatur

- [1] Chen R. T. Q.; Rubanova Y.; Bettencourt J.; Duvenaud D.: Neural Ordinary Differential Equations, Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems, 2018.
- [2] Hermann, R.; Krener, A.J.: Nonlinear controllability and observability. IEEE Transactions on Automatic Control, 1977.
- [3] Diop, S.; Fliess, M.: Nonlinear observability, identifiability, and persistent trajectories, Proc. of the 30th IEEE Conf. on Decision and Control, 1991.
- [4] Fliess, M.; Join, C.; Sira-Ramírez, H.: Non-linear estimation is easy, International Journal Modeling Identification and Control, 2008
- [5] Mboup, M.; Join, C.; Fliess, M.: Numerical differentiation with annihilators in noisy environment, Numerical Algorithms, 2009.
- [6] Othmane, A.; Kiltz, L.; Rudolph, J.: Survey on algebraic numerical differentiation: historical developments, parametrization, examples, and applications, International Journal of Systems Science, 2022.
- [7] Kennel M. B.; Brown, R.; Abarbanel, H. D. I.: Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction, Physical Review A, 1992.
- [8] Binnie, J. A. D.; Dłotko, P.; Harvey, J.; Malinowski, J.; Yim, K. M.: A Survey of Dimension Estimation Methods, arXiv, 2025.
- [9] Bac, J.; Mirkes, E. M.; Gorban, A. N.; Tyukin, I.; Zinovyev, A.: Scikit-dimension: A Python package for intrinsic dimension estimation, Entropy, 2021.
- [10] Jin, P.; Zhang, Z.; Zhu, A.; Tang, Y.; Karniadakis, G. E.: SympNets: Intrinsic structure-preserving symplectic networks for identifying Hamiltonian systems, Neural Networks, 2020.