

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
15. bis 17. September 2025



universität
uulm

GMA-Fachausschuss 2.13
Modellbildung, Identifikation und Simulation
in der Automatisierungstechnik
17. bis 19. September 2025



MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR DYNAMIK KOMPLEXER
TECHNISCHER SYSTEME
MAGDEBURG



Organisation des GMA-FA 2.14

Prof. Dr.-Ing. habil. Joachim Deutscher

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
Universität Ulm

Tel.: +49 731 50 27002

E-Mail: joachim.deutscher@uni-ulm.de



universität
uulm

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

Tel.: +49 391 6110-216

E-Mail: saak@mpi-magdeburg.mpg.de



MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR DYNAMIK KOMPLEXER
TECHNISCHER SYSTEME
MAGDEBURG



Tagungsprogramm
mit Kurzfassungen

Tagungsprogramm

Sonntag 14.09.2025 (Anreisetag)

ab 18:30 Abendessen

Montag 15.09.2025 (GMA-FA 2.14)

- 08:30 – 08:50 Begrüßung der Teilnehmer des GMA-FA 2.14
J. Deutscher (Uni Ulm)
- 08:50 – 09:50 Sliding-Mode Regelungen - Theorie und Anwendungen
M. Horn (TU Graz)
- 09:50 – 10:20 Kaffeepause
- 10:20 – 10:55 Nichtlineare flachheitsbasierte Backstepping-Regelung des Einphasen-Stefan-Problems
J. Deutscher (Uni Ulm), A. Irscheid (Uni des Saarlandes), N. Gehring (OVGU Magdeburg)
- 10:55 – 11:30 Backstepping für eine Klasse linearer PDAE-DAE-Systeme
J. Zimmer, J. Deutscher (Uni Ulm)
- 11:30 – 11:55 Beiträge zur wellenbasierten Formationsregelung von Multiagentensystemen
J. Halmen, J. Wurm, F. Woittennek (UMIT Tirol)
- 12:00 – 14:00 Mittagessen
- 14:00 – 14:25 Modellbasierte Regelung eines nichtminimalphasigen Systems am Beispiel des Čuk-Konverters
K. Röbenack, D. Gerbet (TU Dresden)
- 14:25 – 14:50 Näherungsweise Folgereglerentwurf durch Reihenentwicklung
D. Gerbet, K. Röbenack (TU Dresden)
- 14:50 – 15:15 Beobachter für Sprühtrocknungsprozesse mit unbekannter Verdunstungsrate
A. Lepsien, A. Schaum (Uni Hohenheim)
- 15:15 – 15:40 Time-Varying Stabilization of General Nonholonomic Systems in the Sense of Classical Solutions
A. Zuyev (MPI Magdeburg)
- 15:40 – 16:10 Kaffeepause
- 16:10 – 16:45 Flachheits- und datenbasierte Vorsteuerungsstrategie zur Kompensation von Geschwindigkeitseinbrüchen bei Walzprozessen
J. Reinhard (FAU Erlangen), K. Löhe (Primetals Erlangen), K. Graichen (FAU Erlangen)
- 16:45 – 17:10 Eigenschaftsregelung in mehrstufigen Presshärteverfahren
H. Baumann (KIT), L. Gussek, J. Martschin (TU Dortmund), D. Ratke (KIT), Y. Korkolis (TU Dortmund), T. Meurer (KIT)
- 17:10 – 17:35 Steuerung des Reifegrads für Betonstrukturen aus hochfestem Beton
D. Ratke, T. Meurer (KIT)
- 18:30 Abendessen

Dienstag 16.09.2025 (GMA-FA 2.14)

08:00 – 08:25	Alternativer Reglerentwurf für asymptotische Störkompensation <i>P. Hippe (FAU Erlangen)</i>
08:25 – 09:00	Flachheit nichtlinearer zeitkontinuierlicher Systeme mit zwei Eingängen <i>M. Schöberl (JKU Linz)</i>
09:00 – 09:35	Zeitdiskrete Zustandsschätzung und Regelung auf Basis impliziter Integrationsverfahren für den magnetischen Schwebeversuch <i>M. Mogler (Uni Grenoble), L. Zhang, P. Kotyczka (TUM)</i>
09:35 – 10:05	Kaffeepause
10:05 – 10:40	Zur Approximation von Operatoren im Kontext von Totzeitsystemen mittels einer Spektralmethode <i>T. Scholl, L. Gröll (KIT)</i>
10:40 – 11:15	Robustifizierung von Beobachtern für Systeme mit quasi-unbekannten Eingängen <i>A. Schaum (Uni Hohenheim), S. Koch (TU Graz)</i>
11:15 – 11:40	Integration algebraischer Ableitungsschätzer in den Entwurf kaskadierter PDE-ODE-Beobachter <i>F. Meiners (TU Darmstadt), A. Othmane (Uni des Saarlandes), J. Adamy (TU Darmstadt)</i>
12:00	Mittagessen
13:10	Ausflug
19:00	Abendessen

Mittwoch 17.09.2025 (GMA-FA 2.14/GMA-FA 2.13)

08:30 – 08:55	Flachheitsbasierte Regelung hyperbolischer Mehrgrößensysteme am Beispiel des Timoshenko-Balkens <i>S. Schmidt (JKU Linz), N. Gehring (OVGU Magdeburg), A. Irscheid (Uni des Saarlandes)</i>
08:55 – 09:30	Gedanken zur Regelungsnormalform linearer hyperbolischer PDE-ODE-Mehrgrößensysteme <i>S. Ecklebe, L. Mayer, F. Woittennek (UMIT Hall)</i>
09:30 – 10:00	Kaffeepause
10:00 – 10:35	Observer-based Funnel Heading Control with Prescribed Settling Time for Ships: Addressing Rudder Dynamics and Saturation <i>R. Shahnazi, T. Hahn, M. Kurowski, T. Jeinsch (Uni Rostock)</i>
10:35 – 11:00	Neural ODE based Control of Multi-Functional Heatpump Systems <i>S. Buck, B. Alt, F. Heber (Bosch Renningen), L. Mikelsons (Uni Augsburg)</i>
11:00 – 11:35	Identifikation und Optimalsteuerung zum transversalen Teilen von ultrakalten Bose Gasen <i>N. Würkner, A. Deutschmann-Olek, A. Kugi (TU Wien)</i>

11:35 – 12:00	Aussprache GMA-FA 2.14 <i>J. Deutscher (Uni Ulm)</i>
12:00 – 14:00	Mittagessen
14:00 – 14:15	Begrüßung der Teilnehmer des GMA-FA 2.13 <i>J. Saak (MPI Magdeburg)</i>
14:15 – 15:15	Surrogate Modeling in the Automotive Industry <i>J. Fehr, J. Kneift, N. Fahse, et. al. (Uni Stuttgart)</i>
15:15 – 15:40	Dynamic Digital Twins for Adaptive Feed-Forward Control in CNC Robotics <i>P. Rodegast (Uni Stuttgart), D. Pfeifer (ISG Industrielle Steuerungstechnik), J. Gesell, J. Fehr (Uni Stuttgart)</i>
15:40 – 16:10	Kaffeepause
16:10 – 16:25	GRAMPC-(D/S): Effiziente Software für die (verteilte/stochastische) nichtlineare modellprädiktive Regelung <i>A. Völz, K. Graichen (FAU Erlangen)</i>
16:25 – 16:40	Teilautomatisierte Erstellung formaler Wissensrepräsentation für interaktive Aufbereitung regelungstechnischer Inhalte <i>J. Fiedler, C. Knoll, K. Röbenack (TU Dresden)</i>
16:40 – 16:55	M-M.E.S.S.-3.2 – The "Matrix Equations, Sparse Solvers" toolbox for MATLAB and GNU Octave <i>J. Saak (MPI Mageburg)</i>
16:55 – 18:00	Softwaresession: Vorführung/Diskussion
18:30	Abendessen

Donnerstag 18.09.2025 (GMA-FA 2.13)

08:30 – 09:05	Über die Parameteridentifikation im geschlossenen Kreis und die dafür optimale Eingangsplanung <i>A. Schaum, A. Lepsien, T. Lundt (Uni Hohenheim)</i>
09:05 – 09:40	Systeme mit reversiblen und irreversiblen Kopplungen: Beschreibung durch Bond-Graphen und eine spezielle GENERIC-Formulierung <i>P. Kotyczka (TUM), P. Betsch (KIT)</i>
09:40 – 10:10	Kaffeepause
10:10 – 10:35	Modellierung forminstabiler Gebinde für die virtuelle Inbetriebnahme eines roboterbasierten Handhabungssystems <i>M. Wehmeier, S. Hain (Uni Stuttgart), M. Hagedorn (Premium Robotics), D. Pfeifer (ISG Industrielle Steuerungstechnik), O. Sawodny (Uni Stuttgart)</i>
10:35 – 11:00	Eine Variante zur numerischen Integration von Einbettungssystemen <i>D. Gerbet, K. Röbenack (TU Dresden)</i>

11:00 – 11:35	Vergleich von Datenreduktionskriterien für Online Gaußprozesse zur Systemidentifikation <i>T. Wietzke, K. Graichen (FAU Erlangen)</i>
11:35 – 12:00	Quantitative Assessment of Sensor Accuracy for Estimating Vertical Deflection in Telescopic Robotic Rails <i>J. Gesell, S. Hoschek, P. Rodegast (Uni Stuttgart), J. Scheid (Robomotion Leinfelden-Echterdingen), J. Fehr (Uni Stuttgart)</i>
12:00 – 13:30	Mittagessen
14:00	Ausflug
19:00	Abendessen

Freitag 19.09.2025 (GMA-FA 2.13)

09:00 – 09:25	Operatorinferenz angewandt auf restringierte mechanische Systeme <i>Y. Filanova, J. Saak, I. Pontes Duff, P. Benner (MPI Magdeburg)</i>
09:25 – 09:50	Rethinking the Engineering Design Task: Tolerance Optimization via Adaptive Learning and Semi-Infinite Programming <i>J. Stecher, L. Kiltz (ZF Friedrichshafen), K. Graichen (FAU Erlangen)</i>
09:50 – 10:15	Automatische Parameteridentifikation eines nichtlinearen parametervariierenden Modells für eine rotierende Kegelfördereinheit <i>J. Hartmann, Ch. Ament (Uni Augsburg)</i>
10:15 – 10:45	Kaffeepause
10:45 – 11:20	Improving parameter identification of an austenite decomposition model using sensitivity analysis and experimental design <i>S. Sannes, L. Jadachowski (TU Wien), M. Niederer (AIT Wien), A. Steinboeck (TU Wien)</i>
11:20 – 12:00	Aussprache GMA-FA 2.13 und Wahl des zweiten Vorsitzenden <i>J. Saak (MPI Magdeburg)</i>
12:00	Mittagessen

Teilnehmerliste

Prof. Jürgen Adamy

TU Darmstadt
Fachgebiet Regelungsmethoden und Intelligente Systeme
sekretariat@ris.tu-darmstadt.de

Daniela Aguirre Salazar

TU Darmstadt
Fachgebiet Regelungsmethoden und Intelligente Systeme
daniela.aguirre@tu-darmstadt.de

Henry Baumann

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik
henry.baumann@kit.edu

Simon Buck

Robert Bosch GmbH
CR/ASI3
Simon.Buck3@de.bosch.com

Prof. Joachim Deutscher

Universität Ulm
Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
joachim.deutscher@uni-ulm.de

Dr. Stefan Ecklebe

UNIT TIROL
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik
stefan.ecklebe@unit-tirol.at

Kaosisochukwu Egbunu

TU Darmstadt
Fachgebiet Regelungsmethoden und Intelligente Systeme
kaosisochukwu.egbunu@tu-darmstadt.de

Prof. Joerg Fehr

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

Julius Fiedler

TU Dresden
Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie
julius.fiedler@tu-dresden.de

Prof. Nicole Gehring

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

Daniel Gerbet

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

Jakob Gesell

Universität Stuttgart
Institut für Technische und Numerische Mechanik
jakob.gesell@itm.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

Marcel Hagedorn

Premium Robotics GmbH
marcel.hagedorn@premium-robotics.com

Jonathan Halmen

UMIT Tirol
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik
jonathan.halmen@umit.at

Julia Isabel Hartmann

Universität Augsburg
Lehrstuhl für Regelungstechnik
julia.hartmann@uni-a.de

Dr. Peter Hippe

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Regelungstechnik
Peter.Hippe@fau.de

Prof. Martin Horn

TU Graz
Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik
martin.horn@tugraz.at

Dr. Abdurrahman Irscheid

Universität des Saarlandes
Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik
a.irscheid@lsr.uni-saarland.de

Prof. Torsten Jeinsch

Universität Rostock
Institut für Automatisierungstechnik
torsten.jeinsch@uni-rostock.de

Lars Jose

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

Prof. Wolfgang Kemmetmüller

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

Anna Klyushina

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

Prof. Paul Kotyczka

TU München
Lehrstuhl für Regelungstechnik
kotyczka@tum.de

Arthur Lepsien

Universität Hohenheim
Lehrstuhl für Prozessanalytik
arthur.lepsien@uni-hohenheim.de

Prof. Boris Lohmann

TU München
Lehrstuhl für Regelungstechnik
Lohmann@tum.de

Nick Math

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

Florian Meiners

TU Darmstadt
Fachgebiet Regelungsmethoden und Intelligente Systeme
florian.meiners@tu-darmstadt.de

Denis Ratke

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik
denis.ratke@kit.edu

Johannes Reinhard

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Regelungstechnik
johannes.reinhard@fau.de

Prof. Johannes Reuter

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

Philipp Rodegast

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

Prof. Joachim Rudolph

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

Prof. Klaus Röbenack

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

Dr. Jens Saak

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

Solveig Sannes

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

Prof. Alexander Schaum

Universität Hohenheim
Lehrstuhl für Prozessanalytik
alexander.schaum@uni-hohenheim.de

Jonas Scheid

Premium Robotics GmbH
Steuerungsentwicklung
jonas.scheid@premium-robotics.com

Prof. Kurt Schlacher

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

Simon Schmidt

Johannes Kepler Universität Linz
Institut für Regelungstechnik
simon.schmidt@jku.at

Dr. Tessina Scholl

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

Benedikt Schwämmle

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik
benedikt.schwaemmle@ovgu.de

Prof. Markus Schöberl

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

Dr. Reza Shahnazi

Universität Rostock
Institut für Automatisierungstechnik
reza.shahnazi@uni-rostock.de

Julia Stecher

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

Prof. Rick Voßwinkel

Westfälische Hochschule Zwickau
Institut für Kraftfahrzeugtechnik
rick.vosswinkel@fh-zwickau.de

Dr. Andreas Völz

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Regelungstechnik
andreas.voelz@fau.de

Marc Wehmeier

Universität Stuttgart
Institut für Systemdynamik
marc.wehmeier@isys.uni-stuttgart.de

Thore Wietzke

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Regelungstechnik
thore.wietzke@fau.de

Prof. Frank Woittennek

UNIT TIROL
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik
frank.woittennek@unit-tirol.at

Nikolaus Würkner

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

Julian Zimmer

Universität Ulm
Institut für Mess-, Regel- und Mikroelektronik
Julian.Zimmer@uni-ulm.de

Prof. Alexander Zuyev

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

Sliding-Mode Regelungen - Theorie und Anwendungen

Martin Horn

Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik, Technische Universität Graz
E-Mail: martin.horn@tugraz.at

Der Vortrag präsentiert die Theorie und ausgewählte praktische Anwendungen verschiedener Sliding-Mode-Konzepte zur Regelung und Zustandsbeobachtung. Neben zeitkontinuierlichen Ansätzen werden auch entsprechende zeitdiskrete Algorithmen und deren Eigenschaften vorgestellt. Ausgehend von sehr einfachen 1-Sliding-Mode Algorithmen wird eine Reihe erfolgreich realisierter Sliding-Mode-basierter Lösungen für Probleme aus den Bereichen der Fahrzeugtechnik, der Elektronik und der Medizintechnik vorgestellt.

Nichtlineare flachheitsbasierte Backstepping-Regelung des Einphasen-Stefan-Problems

J. Deutscher¹, A. Irscheid², N. Gehring³

¹ Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm,

E-Mail: joachim.deutscher@uni-ulm.de

² Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität des Saarlandes,

E-Mail: a.irscheid@lsr.uni-saarland.de

³ Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, OVGU Magdeburg,

E-Mail: nicole.gehring@ovgu.de

Die Backstepping-Methodik ist ein etabliertes Verfahren zum Entwurf von Zustandsrückführungen und -beobachtern für verteilt-parametrische Systeme (SVP) (siehe [5]). Der Schwerpunkt liegt dabei auf linearen Systemen, wofür in den letzten zwei Jahrzehnten zahlreiche Ergebnisse erzielt wurden. Für den Backstepping-Entwurf nichtlinearer SVP existieren dagegen bislang nur wenige Resultate. Dies liegt an der Komplexität der nichtlinearen Backstepping-Transformation in Form einer Volterra-Integral-Funktionalreihe, wie erstmals in [8, 9] für semilineare parabolische Systeme gezeigt wurde.

Eine Alternative zu Volterra-Funktionalreihen bieten *quasilineare parameterveränderliche* (QLPV-) Backstepping-Transformationen, mit denen sich bei vielen nichtlinearen SVP eine Abbildung auf ein gewünschtes Zielsystem erreichen lässt. Dabei wird die Struktur einer linearen Backstepping-Transformation mit zeitlich veränderlichen Parametern beibehalten. Die Parameter hängen dabei vom Zustand ab, weshalb eine quasilineare Transformation resultiert. Da die Kerngleichungen jedoch ebenfalls vom Regelzustand abhängen, müssen sie online gelöst werden. Um dies zu vermeiden, kann man deren Zeitabhängigkeit konstant halten, sodass zu jedem Zeitpunkt nur klassische Kerngleichungen zu lösen sind. Dies führt auf *gain-scheduling*-Ansätze, wie sie erstmals in [7] diskutiert wurden. Die Online-Lösung dieser vereinfachten Kerngleichungen ist allerdings nur in einfachen Fällen durchführbar. Eine weitere Möglichkeit bieten *neuronale Operatoren*, bei denen ein neuronales Netz offline mit den Lösungen der Kerngleichungen trainiert wird. Mit dem resultierenden neuronalen Operator lassen sich die Kerngleichungen im Regelkreis zur Laufzeit effizient lösen (siehe [6]). Durch die Vereinfachung der Kerngleichungen treten jedoch nichtlineare Zusatzterme im Zielsystem auf, die den Entwurf und die Analyse der Regelung erschweren.

Im Vortrag wird ein neuer Zugang zur nichtlinearen Backstepping-Regelung mittels QLPV-Backstepping vorgestellt, bei dem sich die Transformationen zur Vorgabe gewünschter Zielsysteme vorab analytisch bestimmen lassen. Die wesentliche Grundlage hierfür ist der in den letzten Workshops vorgestellte *flachheitsbasierte Entwurf* nichtlinearer Regelungen für parabolische Systeme. Dabei wird eine nichtlineare Transformation auf ein gewünschtes Zielsystem in Flachheitskoordinaten betrachtet, wozu ein Cauchy-Problem mittels Potenzreihenansatz zu lösen ist (siehe [3]). Im Vortrag wird gezeigt, dass sich diese Flachheitstransformation als QLPV-Backstepping-Transformation darstellen lässt. Dies ermöglicht sowohl eine einfache Stabilitätsanalyse mittels der Backstepping-Methodik als auch eine systematische Bestimmung der Transformation auf Basis der Flachheitseigenschaft.

Die neue Entwurfsmethodik wird für eine nichtlineare flachheitsbasierte Folgeregelung des

Einphasen-Stefan-Problems eingesetzt. Es beschreibt Erstarrungs- und Schmelzvorgänge von Substanzen für eine Phase und führt auf parabolische SVP mit einem von der Lösung abhängigen Ortsbereich. Ein typisches Anwendungsbeispiel ist das Kristallwachstum zur Züchtung von Einkristallen bei der Waferherstellung (siehe z. B. [2]). Bisherige Backstepping-Ansätze zur Regelung des Stefan-Problems beschränken sich auf heuristische Transformationen [4] oder auf Linearisierungen entlang einer Solltrajektorie [1]. Im Vortrag wird nach dem Entwurf einer flachheitsbasierten Vorsteuerung zur gezielten Vorgabe des Verlaufs der Phasengrenze zwischen festem und flüssigem Material ein nichtlinearer flachheitsbasierter Folgeregler vorgestellt. Dazu erfolgt die Betrachtung einer QLPV-Backstepping-Transformation auf ein gewünschtes exponentiell stabiles Zielsystem mit vorgebbarer Stabilitätsreserve. Damit lässt sich die Existenz der Transformation auf die Wohlgestelltheit der zugehörigen Kerngleichungen zurückführen und die Stabilität der Regelung einfach nachweisen. Die analytische Bestimmung der Transformation und damit des Reglers erfolgt flachheitsbasiert durch Lösung eines Cauchy-Problems. Für die Rückführung der Flachheitskoordinaten müssen die Zeitableitungen der Phasengrenze aus dem verteilten Zustand bestimmt werden. Dafür wird das numerische Verfahren aus [3] auf das betrachtete Problem erweitert. Die Wirksamkeit des neuen nichtlinearen Folgereglerentwurfs wird abschließend anhand eines Simulationsbeispiels demonstriert.

- [1] ECKLEBE, S. ; GEHRING, N.: Backstepping-based tracking control of the vertical gradient freeze crystal growth process. In: *IFAC-PapersOnLine* 56 (2023), S. 8171–8176
- [2] ECKLEBE, S. ; GEHRING, N. ; WOITTENNEK, F. ; WINKLER, J.: Beiträge zur Regelung des VGF-Kristallzüchtungsprozesses. In: *at - Automatisierungstechnik* 71 (2023), S. 232–243
- [3] IRSCHIED, A. ; GEHRING, N. ; DEUTSCHER, J. ; RUDOLPH, J.: Stabilizing nonlinear ODEs with diffusive actuator dynamics. In: *IEEE Contr. Syst. Lett.* 8 (2024), S. 1259–1264
- [4] KOGA, S. ; DIAGNE, M. ; KRSTIC, M.: Control and state estimation of the one-phase Stefan problem via backstepping design. In: *IEEE Trans. Autom. Control* 64 (2019), S. 510–525
- [5] KRSTIC, M. ; SMYSHLYAEV, A.: *Boundary Control of PDEs — A Course on Backstepping Designs*. Philadelphia : SIAM, 2008
- [6] LAMARQUE, M. ; BHAN, L. ; VAZQUEZ, R. ; KRSTIC, M.: Gain scheduling with a neural operator for a transport PDE with nonlinear recirculation. In: *IEEE Trans. Autom. Control* 70 (2025), S. 5616–5623
- [7] SIRANOSIAN, A. ; KRSTIC, M. ; SMYSHLYAEV, A. ; BEMENT, M.: Gain scheduling-inspired boundary control for nonlinear partial differential equations. In: *J. Dyn. Syst. Meas. Control* 133 (2011). – Art. no. 051007
- [8] VAZQUEZ, R. ; KRSTIC, M.: Control of 1-D parabolic PDEs with Volterra nonlinearities, Part I: Design. In: *Automatica* 44 (2008), S. 2778–2790
- [9] VAZQUEZ, R. ; KRSTIC, M.: Control of 1-D parabolic PDEs with Volterra nonlinearities, Part II: Analysis. In: *Automatica* 44 (2008), S. 2791–2803

Backstepping für eine Klasse linearer PDAE-DAE-Systeme

J. Zimmer, J. Deutscher

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

Die Backstepping-Methode ist ein mittlerweile etabliertes Reglerentwurfsverfahren für verteilt-parametrische Systeme basierend auf Normalformen (siehe [5]). Allerdings beschränken sich bisherige Ergebnisse auf PDE-Systeme. In Anwendungen kommen häufig Systeme vor, die durch partielle differential-algebraische Gleichungen (engl.: Partial Differential Algebraic Equations (PDAE)) beschrieben werden. Diese werden im regelungstechnischen Kontext auch als unendlich-dimensionale Deskriptorsysteme bezeichnet. Sie beinhalten partielle Differentialgleichungen sowie (differential-) algebraische Gleichungen, wodurch komplexere Netzwerke beschrieben werden können. Eine Erweiterung der PDAE-Systeme durch eine Randkopplung mit DAE-Systemen ermöglicht darüber hinaus die Berücksichtigung von konzentriert-parametrischer Dynamik. Ein typisches Beispiel ist die Modellierung von Wärmeleitungsproblemen bei Halbleiterbauelementen (siehe z. B. [1]) oder Übertragungsleitungen (siehe z. B. [3]). Ein weiteres Beispiel stellen Gasnetze dar, bei denen das transiente Verhalten durch Euler-Gleichungen beschrieben wird (siehe z. B. [4]).

In diesem Beitrag wird ein Backstepping-Reglerentwurf für eine Klasse von vollständig aktuierten linearen PDAE-DAE-Systemen vorgestellt, die sich durch

$$\begin{aligned} E\dot{x}(z, t) &= Fx'(z, t) + Ax(z, t), & \text{rg}E &= r < n \\ Q_0x(0, t) &= B_0v(t) \\ Q_1x(1, t) &= B_1u(t) \\ E_0\dot{v}(t) &= F_0v(t) + Hx(0, t), & \text{rg}E_0 &= r_0 < n_0 \end{aligned}$$

beschreiben lässt. Darin bezeichnet $x(z, t) \in \mathbb{R}^n$ die verteilt-parametrische und $v(t) \in \mathbb{R}^{n_0}$ die konzentriert-parametrische Deskriptorvariable sowie $u(t) \in \mathbb{R}^p$ den Eingang. Es wird vorausgesetzt, dass die Anfangsbedingungen konsistent sind und die regulären Matrixbüschel (E, F) , (E_0, F_0) den Differentiationsindex 1 besitzen.

Für den Reglerentwurf wird das unendlich-dimensionale Deskriptorsystem mit Hilfe der Weierstraß-Normalform analytisch entkoppelt (siehe [6, 7]). Dadurch ergeben sich heterodirektionale hyperbolische PDEs, verteilte zeitliche und verteilte örtliche ODEs sowie ein DAE-Teilsystem. Durch Auflösen des algebraischen Teilsystems der DAE und der verteilten örtlichen ODE kann das entkoppelte PDAE-DAE-System in ein hyperbolisches PDE-ODE-System mit verteilter zeitlicher ODE überführt werden, die sich als eine hyperbolische PDE mit Transportgeschwindigkeit Null auffassen lässt (siehe [2]). Für das resultierende System

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_1(z, t) &= \Lambda \tilde{x}'_1(z, t) + \tilde{A}_{11} \tilde{x}_1(z, t) + \tilde{A}_{12}(z) x_2(z, t) \\ \dot{x}_2(z, t) &= \tilde{A}_{21}(z) \tilde{x}_1(z, t) + A_{22} x_2(z, t) \\ \dot{v}_1(t) &= \tilde{J}_0 v_1(t) + \tilde{H}_{11} \tilde{x}_1^-(0, t) \\ \tilde{x}_1^+(0, t) &= \tilde{Q}_+ \tilde{x}_1^-(0, t) + \tilde{Q}_v v_1(t) \\ \tilde{x}_1^-(1, t) &= \tilde{u}_1(t) \end{aligned}$$

wird mit der Annahme, dass $(\bar{J}_0, \tilde{H}_{11})$ steuerbar und A_{22} eine Hurwitzmatrix ist, ein backstepping-basierter Regler entworfen. Dabei erfolgt eine sukzessive Entkopplung und Stabilisierung der einzelnen Teilsysteme. Die Ergebnisse des Reglerentwurfs werden anhand eines elektrischen Netzwerks mit zwei Übertragungsleitungen und einer verteilten Kapazität veranschaulicht und in Simulationen validiert.

Literatur

- [1] BARTEL, A.: First order thermal PDAE models in electric circuit design. In: *Proc. MATHMOD, Vienna, Austria* (2003), S. 1376–1381
- [2] DE ANDRADE, G. ; VAZQUEZ, R. ; KARAFYLLIS, I. ; KRSTIC, M.: Backstepping control of a hyperbolic PDE system with zero characteristic speed states. In: *IEEE Trans. Autom. Control* 69 (2024), S. 6988–6995
- [3] GÜNTHER, M.: A PDAE model for interconnected linear RLC networks. In: *Math. Comp. Mod. Dyn. Syst.* 7 (2001), S. 189–203
- [4] HERTY, M.: Modeling, simulation and optimization of gas networks with compressors. In: *Networks & Heterogeneous Media* 2 (2007), S. 81–97
- [5] KRSTIC, M. ; SMYSHLYAEV, A.: *Boundary Control of PDEs — A Course on Backstepping Designs*. Philadelphia : SIAM, 2008
- [6] MARTINSON, W. ; BARTON, P.: Index and characteristic analysis of linear PDAE systems. In: *SIAM J. Sci. Comput.* 24 (2003), S. 905–923
- [7] ZIMMER, J. ; DEUTSCHER, J.: Backstepping control of linear partial differential-algebraic equations using the Weierstraß normal form. In: *Proc. Conference on Decision and Control (CDC), Rio de Janeiro, Brazil* (2025). – angenommen

Beiträge zur wellenbasierten Formationsregelung von Multiagentensystemen

Jonathan Halmen, 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: {jonathan.halmen,jens.wurm,frank.woittennek}@umit-tirol.at

Das in [1] dargestellte klassische Konsensproblem für agentenbasierte Schwärme wurde bereits in [2] als ein System mit örtlich verteilten Parametern eingeführt. Die zugrunde liegende Agentendynamik wird dabei durch gewöhnliche Differentialgleichungen (gDgln) in Form eines Integrators beschrieben. Seit [3] gilt dieses Problem für gekoppelte modifizierte, viskose Burgers-Gleichungen als gelöst.

In diesem Beitrag werden die bislang betrachteten kinematischen Modelle der einzelnen Agenten durch eine dynamische Beschreibung in Form eines Doppelintegrators ersetzt. Die strukturelle Äquivalenz zwischen den fundamentalen Konsensproblem stellt sich in diesem Fall als semi-diskrete lineare Wellengleichung dar, die sich durch Einführen einer eindimensionalen örtlichen Domäne auf eine kontinuierliche partielle Differentialgleichung (pDgl) mit dynamischen Randbedingungen überführen lässt.

Durch die stationäre Lösung dieser Gleichung lassen sich verschiedene Formationen definieren, die unter anderem instabilen Charakter aufweisen können. Zur Stabilisierung dieser wird eine Zustandsrückführung vorgestellt, die dem Ausgangssystem eine stabile Fehlerdynamik unter Verwendung der Backstepping-Technik aufprägt.

Dazu wird dem Fehlersystem durch Transformation auf die Riemann-Invarianten der Charakter der Gleichungen zu einem linearen gekoppelten hyperbolischen System aus gDgln und pDgln verändert. Unter Anwendung der in [4] erörterten Ansätze wird die Herleitung und der Entwurf der Zustandsrückführung thematisiert.

Literatur

- [1] J. Lunze, Networked Control of Multi-Agent Systems: Application Studies. 2022.
- [2] P. Frihauf und M. Krstic, „Leader-Enabled Deployment Onto Planar Curves: A PDE-Based Approach“, IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, doi: 10.1109/tac.2010.2092210.
- [3] G. Freudenthaler, „Formation Control of Multi-Agent-Systems based on Continuous Problem Formulations“, 2021. doi: 10.34726/HSS.2021.86472.
- [4] N. Gehring, A. Irscheid, J. Deutscher, F. Woittennek, und J. Rudolph, „Control of distributed-parameter systems using normal forms: an introduction“, at - Automatisierungstechnik, 2023, doi: 10.1515/auto-2023-0051.

Modellbasierte Regelung eines nichtminimalphasigen Systems am Beispiel des Čuk-Konverters

K. Röbenack, D. Gerbet

TU Dresden, Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie, Georg-Schumann-Straße 7A,
Tel: +49(0)351/463 33940, E-Mail: {klaus.roebenack,daniel.gerbet}@tu-dresden.de

Bei der modellbasierten Regelung im engeren Sinne (engl. internal model control, kurz IMC) ist das Modell der Regelstrecke Bestandteil des Reglers [2], siehe Abb. 1. Für stabile Regelstrecken mit linearem Modell ist der Regelentwurf leicht durchführbar und findet in der chemischen Industrie sowie der Verfahrenstechnik Anwendung.

Geht man von einer vollständigen Übereinstimmung zwischen Regelstrecke und Modell ($\Sigma = \hat{\Sigma}$) und der Abwesenheit von Störungen ($d \equiv 0$) aus, dann vereinfacht sich die modellbasierte Regelung zu einer Steuerung mit dem IMC-Regler als Steuereinheit. Daraus lassen sich unmittelbar zwei Schlussfolgerungen ableiten:

1. Der geschlossene Regelkreis ist genau dann stabil, wenn sowohl die Strecke Σ als auch der IMC-Regler Ξ stabil sind.
2. Für eine perfekte Folgeregelung ist der Regler als dynamische Inverse der Strecke zu wählen, also $\Xi = \Sigma^{-1}$.

Auch bei einem stabilen Streckenmodell ist die dynamische Inverse praktisch nie stabil. Bei einem linearen Modell mit rationaler Streckenübertragungsfunktion kann die Instabilität der Inversen zwei Ursachen haben:

1. Ist die Streckenübertragungsfunktion streng proper, dann ist die Inverse nicht proper und damit nicht BIBO-stabil (D-Anteil).
2. Besitzt die Streckenübertragungsfunktion Nullstellen in der rechten Halbebene, dann weist die Inverse Polstellen in der rechten Halbebene auf und ist dadurch instabil.

Das erste Problem (Polstellenüberschuss) kann durch ein Tiefpass-Filter umgangen werden. Das zweite Problem (nichtminimalphasige Strecke) lässt sich durch eine Zerlegung in einen minimalphasigen Teil und einen Allpass vermeiden.

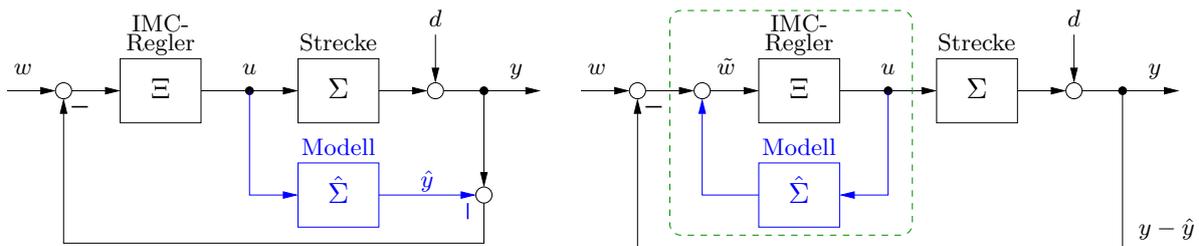


Abbildung 1: Struktur einer modellbasierten Regelung (links), Darstellung als Standardregelkreis (rechts)

Der erste Schritt lässt sich leicht auf nichtlineare Systeme übertragen [8]. Der zweite Schritt ist bei maximalphasigen nichtlinearen Systemen in ähnlicher Weise möglich [3]. Dadurch kann eine modellbasierte Regelung auch bei zahlreichen nichtlinearen Systemen eingesetzt werden [6].

Der Ćuk-Konverter ist ein geschalteter Gleichspannungswandler, mit dem sowohl eine Erhöhung als auch eine Absenkung der Eingangsspannung möglich ist [5]. Für derartige Konverterschaltungen werden in der Fachliteratur zahlreiche Regelungsverfahren beschrieben [1, 4]. Aus dem Netzwerkmodell des Ćuk-Konverters (siehe Abb. 2) leitet man ein nichtlineares Zustandsraummodell ab. Dem Reglerentwurf liegt das gemittelte Modell mit dem Tastverhältnis als Eingang zugrunde. Für die Ausgangsspannung V_2 am Lastwiderstand R erhält man ein nichtminimalphasiges System. Im Vortrag wird ein nichtlinearer modellbasierter Regler vorgestellt [7].

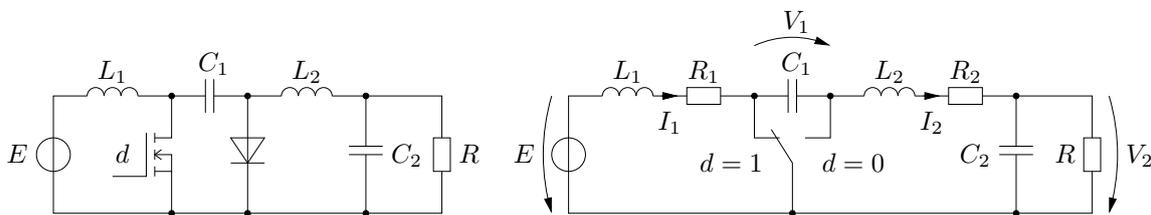


Abbildung 2: Schaltung des Ćuk-Konverters (links), Netzwerkmodell (rechts)

Literatur

- [1] S. Bacha, I. Munteanu, und A. I. Bratcu. *Power Electronic Converters Modeling and Control*. Springer-Verlag, London, 2014.
- [2] C. Brosilow und B. Joseph. *Techniques of Model-Based Control*. Prentice Hall Professional, 2002.
- [3] F. J. Doyle III, F. Allgöwer, und M. Morari. A normal form approach to approximate input-output linearization for maximum phase nonlinear SISO systems. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 41(2):305–309, 1996.
- [4] A. Kugi. Regelung eines Ćuk-Konverters. *at – Automatisierungstechnik*, 48(3): 116–123, 2000.
- [5] R. D. Middlebrook und S. Ćuk. A general unified approach to modelling switching-converter power stages. In: *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, S. 18–34, 1976.
- [6] K. Röbenack. *Nichtlineare Regelungssysteme: Theorie und Anwendung der exakten Linearisierung*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017. ISBN 9783662440902.
- [7] K. Röbenack und D. Gerbet. Internal model control for minimum and maximum phase nonlinear systems. In: *26th Int. Carpathian Control Conference (ICCC)*, 2025.
- [8] D. Schwarzmann. *Nonlinear Internal Model Control with Automotive Applications*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, 2007.

Näherungsweise Folgereglerentwurf durch Reihenentwicklung

D. Gerbet, K. Röbenack

TU Dresden, Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie, Georg-Schumann-Straße 7A,
 Tel: ++49(0)351/463 33940, E-Mail: {daniel.gerbet1,klaus.roebenack}@tu-dresden.de

Die Eingangs-Ausgangs-Linearisierbarkeit eines Systems ist eine sehr nützliche Eigenschaft für den Reglerentwurf: Es lässt sich eine beliebige asymptotisch stabile Dynamik für den Folgefehler, also die Abweichung des Ausgangs von einer Referenztrajektorie, wählen. Daraus ergibt sich direkt eine Vorschrift für die Rückführung auf den Eingang.

Als notwendige Voraussetzung muss ein Ausgang des Systems existieren, der bezüglich des Eingangs einen überall wohldefinierten relativen Grad besitzt. Diese Eigenschaft haben jedoch nicht alle Systeme. Ein solches Beispiel ist die in Abb. 1 skizzierte Wippe, auf der ein Zylinder rollt, und die selbst durch ein Drehmoment gekippt werden kann. Für dieses System wurden bereits Ansätze zum Folgereglerentwurf untersucht [1, 2].

Im Falle eines bestimmten Verhältnisses der Trägheitsmomente und der Aufhängung der Wippe oder für einen verhältnismäßig kleinen Radius des Zylinders lässt sich das System durch die Differentialgleichungen

$$\ddot{v} = Bv\dot{\theta}^2 - Bg \sin \theta, \quad \ddot{\theta} = u \quad (1)$$

beschreiben. Dabei bezeichnet θ die Auslenkung der Wippe gegenüber der Horizontalen, v den Rollweg des Zylinders auf der Wippe, und der Eingang u wurde als Winkelbeschleunigung der Wippe gewählt, welche in das Drehmoment umgerechnet werden kann. Der Parameter B hängt von den Trägheitseigenschaften des rollenden Zylinders ab und g bezeichnet die Fallbeschleunigung.

Der Ausgang v hat den relativen Grad 3 bezüglich u , ist aber für $v = 0$ oder $\dot{\theta} = 0$ nicht wohldefiniert. Daher ist eine linearisierende Rückführung nicht möglich.

Andererseits fällt auf, daß das um die Ruhelage $\theta = 0$ linearisierte System lediglich einen Vierfachintegrator darstellt. Dieses lineare System ist steuerbar. Man kann also erwarten, daß ein Folgeregler für das exakte (nichtlineare) System (1) existiert, der sich für kleine Auslenkungen so wie ein am linearisierten System entworfener linearer Regler verhält.

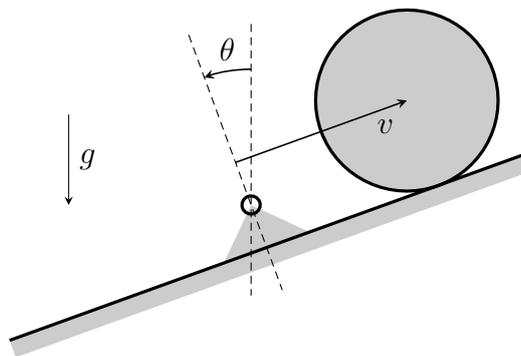


Abbildung 1: Wippe mit rollendem Zylinder

Derartige Regler lassen sich systematisch für Systeme der Form

$$\dot{x} = Ax + bu + F(x, u),$$

wobei die Linearisierung des als analytisch vorausgesetzten Vektorfeldes F um die Gleichgewichtslage $(x, u) = (0, 0)$ verschwindet, und das linearisierte System

$$\dot{x} = Ax + bu \tag{2}$$

steuerbar ist, entwerfen. Hierzu wird eine asymptotisch stabile Fehlerdynamik für den Folgefehler $v - v_{\text{ref}}$ vorgegeben. Die Rückführung wird als Reihe

$$u = k_1(x, v_{\text{ref}}, \dot{v}_{\text{ref}}, \dots) + k_2(x, v_{\text{ref}}, \dot{v}_{\text{ref}}, \dots) + k_3(x, v_{\text{ref}}, \dot{v}_{\text{ref}}, \dots) + \dots$$

angesetzt, wobei k_i homogene Polynome vom totalen Grad i in den Zustandsvariablen x und den Ableitungen der Referenztrajektorie sind.

Der lineare Regler

$$u = k_1(x, v_{\text{ref}}, \dot{v}_{\text{ref}})$$

ergibt sich durch Umstellen der Fehlerdynamik und des linearen Systems (2) nach dem Eingang. Für die Terme höheren Grades wird der nichtlineare Teil $F(x, u)$ des Vektorfeldes in seine Maclaurin-Reihe entwickelt. Die Koeffizienten des Reglers lassen sich dennoch sukzessive bestimmen, ohne das nichtlineare Gleichungen zu lösen sind. Durch Berücksichtigung der Terme von höherem Grade im Regler ergibt sich schließlich eine Fehlerdynamik, die der vorgegebenen bis zu diesem Grad entspricht.

Durch die Entwicklung in Potenzreihen erhält man lediglich ein lokales Regelgesetz. Zudem werden mit steigendem Grad des Reglers höhere Ableitungen der Referenztrajektorie benötigt, und somit strengere Forderungen an deren Differenzierbarkeit gestellt. Dennoch lässt sich der verbleibende Folgefehler durch Berücksichtigung der Terme bis zu einem bestimmten Grad im Vergleich zum linearen Regler verringern.

Literatur

- [1] J. Hauser, S. Sastry, und P. Kokotovic. Nonlinear control via approximate input-output-linearization: The ball and beam example. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 37(3):392–398, 1992.
- [2] D. J. Leith und W. E. Leithead. Input-output linearisation of nonlinear systems with ill-defined relative degree: the ball and beam revisited. In: *Proc. American Control Conference (ACC)*, Band 4, S. 2811–2816. American Automatic Control Council, 2001.

Beobachter für Sprühtrocknungsprozesse mit unbekannter Verdunstungsrate

Arthur Lepsien†, Alexander Schaum†

†Lehrstuhl für Prozessanalytik, Universität Hohenheim, Garbenstraße 23, 70599 Stuttgart,
Tel.: +49(0)711/45922824, E-Mail: arthur.lepsien@uni-hohenheim.de

Sprühtrocknung ist einer der grundlegenden Prozesse in der verfahrenstechnischen Herstellung von Pulvern aus Flüssigkeiten. Hierbei ist die Verdunstungsrate, welche den Übergang von Tropfen zu Partikel beschreibt, eine der wesentlichen Einflussgrößen auf die resultierenden Produkteigenschaften. Ein empirischer Zusammenhang für jedes Stoffgemisch wird oftmals über aufwändige Einzeltropfen-Experimente bestimmt. Um dies systemtheoretisch zu vermeiden, kann diese Größe als unbekannt angenommen werden und mittels geeigneter Beobachter geschätzt werden.

Die grundlegenden Komponenten von Sprühtrocknern sind in Abb. 1 dargestellt. Das Ver-

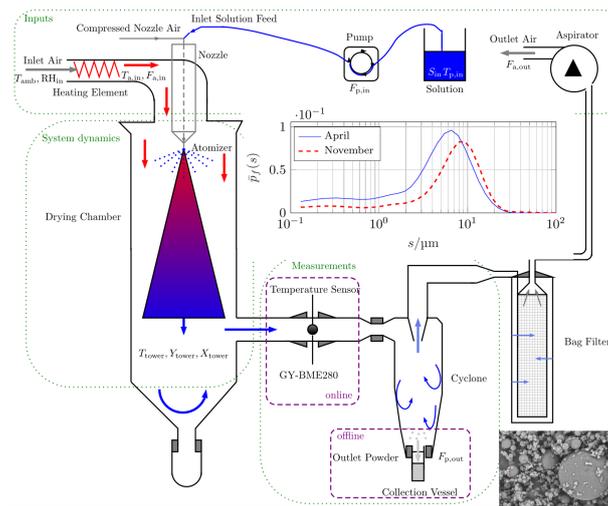


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Sprühtrocknungsprozesses.

fahren basiert auf einer sprühbaren Flüssigkeit (Lösung, Emulsion oder Suspension), die durch eine Düse oder ein rotierendes Rad zerstäubt wird. Die erzeugten Tröpfchen werden anschließend in einem Strom von Heißgas (typischerweise Luft) in der Trockenkammer getrocknet. Das Sammeln der getrockneten Partikel aus dem Gas erfolgt typischerweise durch einen Zyklon. Das Endprodukt wird in der Produktkammer gesammelt. Die Luft strömt durch einen Auslassfilter und wird von der Abgasturbine (Aspirator) abgesaugt. Während des Trocknungsprozesses wird jedes Partikel aus einem Tröpfchen gebildet.

Zur Beschreibung wird ein konzentriert-parametrisches Modell genutzt. Dieses kann im vorliegenden Fall durch ein Drei-Zustands-Modell [1] beschrieben werden. Der Zustandsvektor besteht aus der Produktfeuchte, der Luftfeuchte und der Temperatur in der Trocknungskammer, wobei die Temperatur und die Luftfeuchte gemessen werden. Das Problem der Zustandsschätzung wird durch den Entwurf eines Beobachters mit unbekanntem Eingang gelöst, wobei die Verdunstungsrate als unbekannter zeitabhängiger begrenzter Quell-

term betrachtet wird. Im Zustandsraum ergibt sich

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, u) + \mathbf{g}(\mathbf{x})w, \quad (1a)$$

$$\mathbf{y} = C\mathbf{x}, \quad (1b)$$

wobei die Verdunstungsrate $w(t) := R_w(\mathbf{x}(t)) \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ als unbekannter, beschränkter Eingang angenommen wird.

Im Vortrag wird auf dem Artikel [2] aufgebaut. Es wird gezeigt, dass es unter Verwendung einer geeigneten integralen Zustandstransformation auf der Grundlage von Energie- und Massenerhaltungsmechanismen möglich ist, durch modellbasierte Sensorfusion zuverlässige Schätzungen für die Produktfeuchte zu erhalten. Die Leistungsfähigkeit des vorgeschlagenen Schemas wird anhand numerischer Simulationen für ein zuvor validiertes Prozessmodell bewertet. Weiterhin wird gezeigt, wie mittels Sliding-Mode Ableitungsschätzern die Verdunstungsrate w mit den Modelldaten extrahiert werden kann.

Literatur

- [1] Lepsien, A., Schaum, A.: Thermodynamic model identification for a one-stage spray dryer. IFAC-PapersOnLine, 58(14), 228-234, 2025
- [2] Lepsien, A., Hernández-Escoto, H., Schaum, A.: Evaporation rate independent state estimation for a spray drying process. 14th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, including Biosystems (DYCOPS), 2025.

Time-Varying Stabilization of General Nonholonomic Systems in the Sense of Classical Solutions

Alexander Zuyev

Max Planck Institute for Dynamics of Complex Technical Systems, Sandtorstraße 1,
39106 Magdeburg, Tel: ++49(0)391/6110478, E-Mail: zuyev@mpi-magdeburg.mpg.de

We address the problem of stabilizing driftless control-affine systems that satisfy the Lie algebra rank condition (LARC). In our earlier work, a control design scheme with trigonometric dither components was proposed to stabilize the equilibrium of a nonholonomic system under broad controllability assumptions. This approach relies on a sampling-based framework, which differs from the classical notion of solutions for the associated nonautonomous closed-loop system. In this talk, we establish sufficient conditions that ensure the convergence of classical solutions of the closed-loop system to the equilibrium. The proposed conditions and design procedure are applied to several nonholonomic systems and illustrated through numerical simulations. This talk is partially based on [1].

Literatur

- [1] Zuyev, A.; Grushkovskaya, V.: On classical solutions in the stabilization problem for nonholonomic control systems with time-varying feedback laws, arXiv preprint arXiv:2503.18006, 2025.

Flachheits- und datenbasierte Vorsteuerungsstrategie zur Kompensation von Geschwindigkeitseinbrüchen bei Walzprozessen

Johannes Reinhard†, Klaus Löhe‡, Knut Graichen†

†Lehrstuhl für Regelungstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg, Cauerstr. 7, D-91058 Erlangen, Tel: ++49 9131/85-27144, E-Mail: johannes.reinhard@fau.de

‡Primetals Technologies Germany GmbH, Bunsenstraße 43, D-91058 Erlangen, E-Mail: klaus.loeh@primetals.com

Eine zentrale Prozessgröße beim Walzen ist die Umfangsgeschwindigkeit der Walzen. Diese muss mit hoher Genauigkeit die gewünschte Geschwindigkeit einhalten und das Walzlastdrehmoment zur Verfügung stellen. Die Walzen werden über den Antriebsstrang, bestehend aus Spindeln und Getriebe, von elektrischen Antrieben betrieben und weißt oftmals mechanische Eigenschwingungen auf. Neben dem Führungsverhalten der Regelung, ist insbesondere das Störverhalten beim sogenannten Anstich kritisch: Dabei tritt ein erheblicher Lastwechsel auf, da das Walzgut in den Walzspalt eingeführt wird und die Walzen sprunghaft stark belastet werden. Der resultierende Geschwindigkeitseinbruch der Walzen beim Anstich beeinflusst maßgeblich die Stabilität des Walzprozesses sowie die Qualität des Endprodukts.

In der Praxis reicht die Dynamik konventioneller Drehzahlregler aufgrund des oben erwähnten Antriebsstrangs nicht aus, um diesen Störungseinfluss wirksam zu kompensieren [1, 2]. Ein verbreiteter Lösungsansatz in der Praxis besteht darin, die Sollgeschwindigkeit der Antriebe vor dem Anstich zu erhöhen, um die Amplitude des Geschwindigkeitseinbruchs zu verringern. Dieser Ansatz zeigt bereits positive Effekte, erfolgt jedoch meist heuristisch und adressiert nicht die eigentliche Ursache der Störung. Infolgedessen treten weiterhin Schwingungen und Geschwindigkeitsabweichungen im Antriebsstrang auf, die vollständig vom Regler kompensiert werden müssen [1, 2].

Um den Geschwindigkeitseinbruch und die damit einhergehenden Störungen zu kompensieren, wird im Vortrag ein neuartiger Ansatz vorgestellt. Die Grundidee besteht darin, eine modellbasierte Vorsteuerungsstrategie zu entwickeln, die den Antriebsstrang und die Walzen so beschleunigt, dass das erzeugte Beschleunigungsmoment und die Zielgeschwindigkeit der Walzen zum Anstichzeitpunkt dem erwarteten Walzlastmoment entspricht. Das Vorsteuerungsdesign nutzt die differenzielle Flachheit der Antriebsstrangdynamik aus und erlaubt damit eine exakte Planung für die Systemzustände und Stellgrößen. Die Randbedingungen der geplanten Trajektorie, die einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Trajektorie haben, werden mittels eines modellbasierten Optimierungsproblems online ermittelt. Im Vortrag wird die Wirksamkeit des Verfahrens durch umfangreiche experimentelle Ergebnisse für ein Gerüst der Fertigstraße einer industriellen Warmbandwalzanlage nachgewiesen [3].

Der neue Ansatz zeigt im Vergleich zu den bisherigen Verfahren erhebliche Verbesserungen bei der Reduktion des Geschwindigkeitseinbruchs und der resultierenden Schwingungen im Antriebsstrang. Es bestehen jedoch zusätzliche Herausforderungen, da unterschiedliche Gerüsttypen, wie das Vorgerüst und mehrere Fertigerüste, sowie schwer modellierbare und teils unbekannte Prozessparameter die Wirksamkeit der Methode beeinflussen. Im Vortrag wird daher eine datengestützte Erweiterung des Ansatzes vorgestellt. Dabei erfolgt zunächst eine adaptive Parametrierung der Vorsteuerung, gefolgt von einer

Bayes'schen Optimierung zur Bestimmung optimaler Parameter während des Betriebs. Die Wirksamkeit des erweiterten Verfahrens wurde ebenfalls umfangreich experimentell validiert auf allen Walzgerüsten einer Warmbandwalzanlage [4].

Literatur

- [1] A. Scaglia and G. Melandri, "Impact speed drop compensation procedure for a new layout wire rod mill," in *Proceedings of the Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, 2002, pp. 573–578.
- [2] M. Mahfouf, Y. Yang, M. A. Gama, and D. A. Linkens, "Roll speed and roll gap control with neural network compensation," *ISIJ International*, vol. 45, no. 6, pp. 841–850, 2005.
- [3] J. Reinhard, K. Löhe, N. Petrasch, S. Kallabis, and K. Graichen, "Dynamic compensation of the threading speed drop in rolling processes," *Journal of Process Control*, vol. 137, May 2024,
- [4] J. Reinhard, K. Löhe, S. Kallabis, and K. Graichen, "Dynamic Compensation of the Threading Speed Drop in Rolling Processes: Bayesian Optimization of the Roughing and Finishing Mill, " *Journal of Process Control* (eingereicht), Preprint verfügbar: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5281284

Eigenschaftsregelung in mehrstufigen Presshärteverfahren

H. Baumann[†], **L. Gussek**[‡], **J. Martschin**[‡], **D. Ratke**[†], **Y. Korkolis**[‡], **T. Meurer**[†]

[†]Institut für Mechanische Verfahren und Mechanik, 76131 Karlsruhe, Tel: +49(0)681/12345678,

E-Mail: {henry.baumann, denis.ratke, thomas.meurer}@kit.edu

[‡]Institut für Umformtechnik und Leichtbau, 44227 Dortmund, Tel: ++49(0)681/12345678, E-

Mail: {lukas.gussek, juri.martschin, yannis.korkolis}@iul.tu-dortmund.de

In mehrstufigen Presshärteprozessen können Produkte mit komplexer Geometrie in hoher Stückzahl gefertigt werden, weshalb das Verfahren in vielen Industriezweigen angewendet wird. Beispiele aus der Automobilindustrie sind Getriebeteile oder Elemente des Gurt-schlusses [1]. Da die Produkteigenschaften von der thermo-mechanischen Entwicklung im Prozess abhängen sind deren Vorhersage und gezielte Einstellung eine herausfordernde Aufgabe [2]. Diese wird durch die Fehlerfortpflanzung über die Fertigungsstufen erschwert.

Betrachtet wird ein mehrstufiges Presshärteverfahren, in welchem durch Wärmebehandlung und mechanische Verformung die Eigenschaften des Werkstoffs gezielt verändert werden. Der Versuchsaufbau besteht aus einem Folgeverbundwerkzeug, welches in einer hydraulischen Servopresse mit einer Hubrate f_{SR} betrieben wird. Dabei werden zunächst einzelne Werkstücke ausgeschnitten, welche durch eine Streifenanbindung miteinander verbunden sind. Anschließend werden insgesamt vier Stufen durchlaufen, in denen der Werkstoff zunächst durch induktive Heizung auf eine Temperatur oberhalb der materialspezifischen Austenitisierungstemperatur T_γ gebracht wird. In der zweiten Stufe wird das Werkstück in einem Abschnitt auf die Temperatur T_{Heat} erwärmt und in einem anderen Abschnitt durch einen Luftstrom mit dem Luftdruck p_{Air} gekühlt. In der dritten Stufe folgt die erstmalige Umformung, bei welcher am freien Ende des Werkstücks eine definierte Kraft F_{BH} aufgebracht wird, während ein hutförmiges Profil in das Werkstück eingedrückt wird. In der letzten Stufe, der Gesenkbiegestufe, wird das Ende des Werkstücks umgeformt. Insgesamt ergeben sich die fünf Stellgrößen $\mathbf{u} = [f_{SR}, T_\gamma, T_{Heat}, p_{Air}, F_{BH}]^T$. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zeigt Abbildung 1.

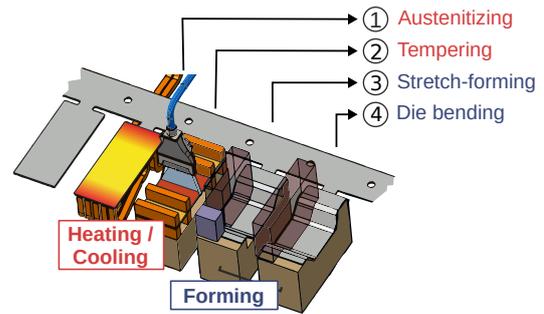


Abbildung 1: Schematische Prozessdarstellung des mehrstufigen Presshärtens [3].

In vorherigen Arbeiten [4, 5] wurde eine parametrische Variante der dynamischen Modalzerlegung (DMD) zur Modellierung des Prozesses verwendet, wobei auf Basis von Simulationsdaten ein lineares Modell erstellt wurde, welches die zeitliche Entwicklung der Temperatur des Werkstücks entlang der Längsachse beschreibt. In diesem Beitrag wird ein anderes Verfahren vorgestellt, welches eine Ordnungsreduktion des Finite-Elemente-Modells des Prozesses nutzt. So können die Stellgrößen als kontinuierliche Variablen behandelt werden, während bei der parametrischen DMD ein parameterspezifisches Modell für jede Stellgrößenkonfiguration erstellt werden muss. Den Eingangsvektor $\mathbf{v}(t) \in \mathbb{R}^6$ bilden dabei die Wärmeströme der verschiedenen Flächen des Werkstücks, welche durch die Behandlung in den jeweiligen Stufe und somit durch die Stellgrößen \mathbf{u} beeinflusst werden. Mithilfe des IRKA-Modellordnungsreduktionsverfahrens ergibt sich ein reduziertes Modell.

Basierend auf dem reduzierten Modell werden optimierungsbasierte und Kalman-Filterbasierte Zustandsschätzer entworfen, um die zweidimensionale Temperaturverteilung des Werkstücks zu schätzen. Dabei werden Temperaturmessungen einer installierten Wärmebildkamera und Messungen der in die Werkzeuge eingebrachten Thermoelemente zur Beobachterkorrektur genutzt. Aus der resultierenden Temperaturhistorie können im Weiteren Eigenschaften wie die Härte oder die Blechdünung des Werkstücks abgeleitet werden. Dazu wurde in vorherigen Arbeiten ein Plastizitätsmodell entwickelt, welches die Umformung abbildet. Zusätzlich simuliert ein Mikrostrukturmodell die Entwicklung der Materialphasen. Da beide Modelle aufgrund ihrer Komplexität jedoch nicht für einen praktischen Einsatz geeignet sind, wurde basierend auf den Simulationsdaten jeweils ein Neuronales Netz trainiert, das die Eigenschaften zuverlässig abbilden kann [3]. Neben der Eigenschaftsschätzung ermöglichen diese Modelle eine optimierungsbasierte Trajektorienplanung, welche die Kenngrößen der Temperaturtrajektorie als auch die Niederhaltezeit und Hubrate ermittelt. Mithilfe des *Differential-Evolution*-Algorithmus erfolgt eine globale Parameteroptimierung, welche die Vorsteuerung des Prozesses bildet [6]. Die Folgeregelung wird in der Temperierstufe durch eine modellprädiktive Regelung realisiert. Die Validierung des Modells, der entworfenen Beobachter und des Reglerkonzepts erfolgt anhand des realen Prozesses.

Danksagung: Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projekt 424334660 (Tekkaya/ Meurer) im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP2183 „Eigenschaftskontrollierte Umformprozesse“.

Literatur

- [1] K. Mori, T. Maeno, M. Tsuchiya, and T. Nanya, “Inclusion of hot stamping operations in progressive-die plate forging of tailored high strength gear part,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 90, no. 9, pp. 3585–3594, 2017.
- [2] N. Demazel, H. Laurent, J. Coër, M. Carin, P. Le Masson, J. Favero, R. Canivenc, and H. Salmon-Legagneur, “Investigation of the progressive hot die stamping of a complex boron steel part using numerical simulations and gleeble tests,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 99, no. 1, pp. 803–817, 2018.
- [3] J. Martschin, M. Wrobel, J. Grodotzki, T. Meurer, and A. E. Tekkaya, “Soft sensors for property-controlled multi-stage press hardening of 22mnb5,” *Automotive Innovation*, vol. 6, pp. 252–363, 2023.
- [4] M. Wrobel, J. Martschin, T. Meurer, E. Tekkaya, “Data-Driven Temperature Estimation for a Multi-Stage Press Hardening Process,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 2, pp. 4252–4257, 2023.
- [5] H. Baumann, J. Nazarenius, J. Martschin and, A.E. Tekkaya, T. Meurer, “2D Sheet Temperature Estimation for Multi-Stage Press Hardening in a Progressive Die,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 59, no. 1, pp. 133–138, 2025.
- [6] R. Storn, K. Price, “Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces,” *Journal of Global Optimization*, vol. 11, pp. 341–359, 1997.

Steuerung des Reifegrads für Betonstrukturen aus hochfestem Beton

D. Ratke†, T. Meurer†

†Digital Prozess Engineering Group, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik,
76131 Karlsruhe, Tel: +49(0)721 608-41483, E-Mail: {denis.ratke, thomas.meurer}@kit.edu

Beton als ein Mehrkomponentenmaterial zählt zu den weltweit am häufigsten eingesetzten Baustoffen. Durch gezielte Anpassung der Zusammensetzung und Modifikation von Zusatzstoffen konnten seine mechanischen und chemischen Eigenschaften im Laufe der Zeit kontinuierlich verbessert werden. Dabei entstanden verschiedene Betonarten für spezifische Anwendungsbereiche. Eine dieser Entwicklungen ist der Hochleistungsbeton (HFB), der sich durch hohe Druckfestigkeit, Dichte und Dauerhaftigkeit auszeichnet. Neben diesen Merkmalen lassen sich weitere Eigenschaften, wie etwa die Frühfestigkeit, das reduzierte Schwind- und Kriechverhalten, durch gezielte Temperaturbehandlungen während der Aushärtphase verbessern [3]. Zur quantitativen Beschreibung dieser durch Wärmeeintrag beeinflussten Eigenschaften eignet sich das Konzept des Reifegrads. Auf dieser Grundlage kann die Entwicklung der mechanischen Eigenschaften von HFB im Zeitverlauf prognostiziert werden [2, 4]. Neben der Vorhersage bietet das Reifegradkonzept auch das Potential zur gezielten Steuerung der mechanischen Leistungsfähigkeit, indem der Temperatureintrag in Aushärtungsphase gezielt gesteuert wird.

Dem zugrunde liegenden Reifemodell liegt ein gekoppeltes System nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen (PDGL)

$$\begin{aligned}
\gamma \partial_t T &= \nabla(\kappa \nabla T) + Q(m) \partial_t m, & \text{in } \Lambda, \\
\partial_t \theta &= \nabla(D(\theta) \nabla \theta) - \eta \partial_t m, & \text{in } \Lambda, \\
\partial_t m &= \mu(1 - m) \theta e^{-E/RT}, & \text{in } \Lambda, \\
\lambda \nabla T \cdot \mathbf{n} &= \dot{q}, & \text{auf } \Pi, \\
D_m \nabla \theta \cdot \mathbf{n} &= 0, & \text{auf } \Pi, \\
T(\cdot, 0) = T_0, \theta(\cdot, 0) = \theta_0, m(\cdot, 0) = m_0, & & \text{in } \Omega,
\end{aligned}$$

mit $\Lambda := [0, \tau) \times \Omega$ und $\Pi := [0, \tau) \times \partial\Omega$, wobei die Temperatur T , Feuchtigkeit θ und Reife m zeit- und ortsabhängig modelliert werden. Die Einbettung dieser Gleichungen in ein Optimierungsproblem führt zu einem dynamischen Steuerungsproblem mit PDGLn-Nebenbedingungen. Zur Lösung kommen gradientenbasierte Verfahren in einer sequentiellen Optimierungsschleife zum Einsatz, welche auf dem sogenannten *discretized-then-optimize*-Ansatz basieren. Dabei erfolgt zunächst eine Diskretisierung der zugrundeliegenden Gleichungen mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM)

$$\dot{\boldsymbol{\chi}}(t) = \mathbf{f}(t, \boldsymbol{\chi}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)), \quad t > 0, \quad \boldsymbol{\chi}(0) = \boldsymbol{\chi}_0,$$

mit dem Zustandsvektor $\boldsymbol{\chi}(t) = [\mathbf{T}(t), \boldsymbol{\theta}(t), \mathbf{m}(t)]^T \in \mathbb{R}^n$ und dem Steuereingang $\dot{\mathbf{q}}(t)$. Anschließend wird der Gradient mithilfe der Adjungierten-Methode im Verbund mit automatischen Differenzierungsverfahren für jede Optimierungssequenz berechnet und die gesuchte Steuerung $\dot{\mathbf{q}}$ iterativ verbessert bis das Optimum erreicht ist. Die Adjungierten-Methode ermöglicht eine besonders effiziente und präzise Gradientenberechnung, da ihre Rechenkosten unabhängig von der Anzahl der Entscheidungsvariablen sind.

Trotz seiner Vorteile hat dieser Ansatz auch Grenzen, da neben dem Originalsystem zusätzlich das adjungierte System in jedem Optimierungsschritt gelöst werden muss. Gerade bei komplexen PDGLn mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung kann dies einen erheblichen Rechenaufwand bedeuten. Um die Rechenkosten zu senken, kommen Methoden der Modellordnungsreduktion (MOR) zum Einsatz. Diese projizieren das hochdimensionale System n auf einen deutlich kleineren Unterraum der Dimension $r \ll n$. Dadurch ergibt sich ein wesentlich kompakteres Ersatzmodell, das sich mit weniger Rechenaufwand auswerten lässt. Eine gängige MOR-Technik ist die Proper-Orthogonal-Dekomposition, mit deren Hilfe eine niederdimensionale Basis aus Simulationsdaten X_χ konstruiert werden kann. Dabei wird mittels der Singulärwertzerlegung (SVD) der Simulationsdaten $X_\chi = \Psi_\chi \Sigma_\chi U_\chi^T$, eine orthogonale Basis $\Psi_\chi \in \mathcal{R}^{r \times n}$ ermittelt, mit der sich die Zustände in den reduzierten Raum projizieren $\tilde{T} = \tilde{\Psi}_T^T T$, $\tilde{\theta} = \tilde{\Psi}_\theta^T \theta$, $\tilde{m} = \tilde{\Psi}_m^T m$ lassen. Da die POD primär für lineare Probleme geeignet ist, werden bei nichtlinearen Systemen sogenannte Hyperreduktionsverfahren benötigt. Eine verbreitete Methode ist die Discrete-Empirical-Interpolation-Method (DEIM) [1]. Anstatt die nichtlinearen Terme vollständig im hoch-dimensionalen Raum zu berechnen, erfolgt die Auswertung nur an ausgewählten diskreten Punkten (Stützstellen). Diese Stützstellen werden ebenfalls datenbasiert – wiederum mithilfe der SVD – aus den nichtlinearen Komponenten extrahiert. In Kombination mit der POD ergibt sich so ein vollständig reduziertes Modell

$$\dot{\tilde{\chi}}(t) = \mathbf{f}(t, \tilde{\chi}(t), \dot{\tilde{\chi}}(t)), \quad t > 0, \quad \tilde{\chi}(0) = \tilde{\chi}_0,$$

das auch nichtlineare Effekte effizient approximieren kann.

Dieser Beitrag befasst sich mit der numerischen Steuerung des Betonreifeprozesses auf Basis eines verteilt-parametrischen Modells unter Verwendung mathematischer Methoden aus dem Bereich der optimalen Steuerung. Durch die Kombination Modellordnungsreduktion, Hyperreduktion und Optimierung wird eine effiziente Steuerung des Reifeprozesses untersucht und ermöglicht, die langfristig auch eine Echtzeitregelung in praxisnahen Anwendungen unterstützen kann.

Danksagung: Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projekt 458161128 (Mark/ Meurer).

Literatur

- [1] Chaturantabut, S.; Sorensen, D.C. Application of POD and DEIM on Dimension Reduction of Non-Linear Miscible Viscous Fingering in Porous Media. *Math. Comput. Model. Dyn. Syst.* **2011**, *17*, 337–353. <https://doi.org/10.1080/13873954.2011.547660>
- [2] Zhang, J.; Cusson, D.; Monteiro, P.; Harvey, J.: *New Perspectives on Maturity Method and Approach for High Performance Concrete Applications*, Cement and Concrete Research, **38**(12), 1438–1446 (2008).
- [3] Stindt, J.; Forman, P.; Mark, P. Influence of Rapid Heat Treatment on the Shrinkage and Strength of High-Performance Concrete. *Materials* 2021, *14*, 4102. <https://doi.org/10.3390/ma14154102>
- [4] Ratke, D.; Meurer, T.; Schwarz, Y.; Sanio, D.; Mark, P. Model-Based Estimator Design for the Curing Process of a Concrete Structure. *IFAC-PapersOnLine* **2023**, *56* (2), 3241–3246.

Alternativer Reglerentwurf für asymptotische Störkompensation

Peter Hippe, Günter Roppenecker

FAU Erlangen

Ein systematischer Ansatz zur Vermeidung von Regler-Windup bei Stellbegrenzung ist die Beobachertechnik, bei der man einfach den Beobachter mit dem begrenzten Stellsignal ansteuert. Dies beseitigt systematisch alle unerwünschten Auswirkungen der Regler-Dynamik, sodass eventuell verbleibende Windup-Effekte so sind, als wenn lediglich eine konstante Zustandsrückführung vorläge. Beim Entwurf von störunterdrückenden Regelungen nach dem internen Modell-Prinzip geht man von der Zustandsregelung der um das Störmodell erweiterten Strecke aus. Da die Zustände des Störmodells messbar sind, benötigt man lediglich einen Zustandsbeobachter für die nicht erweiterte Strecke. Die Dynamik des resultierenden Regelkreises besteht somit aus jener der geregelten Strecke, des geregelten Störmodells und der des Zustandsbeobachters. Folglich führt eine Ansteuerung des Zustands-Beobachters mit dem begrenzten Stellsignal nicht zu einer Stabilisierung des Reglers während der Begrenzung. Deshalb wurden verschiedene Zusatz-Maßnahmen entwickelt, um dieses Problem zu beheben [1]. Der hier vorgestellte Ansatz beschreibt einen grundsätzlich anderen Weg [2]. Er beginnt mit einem Zustandsregler hinreichender Ordnung, der zunächst nur für die Polzuweisung dimensioniert wird. Anschließend modifiziert man die interne Regler-Realisierung so, dass eine robuste Störunterdrückung gewährleistet ist. Dadurch ist die Beobachertechnik ohne weitere Maßnahmen anwendbar. Dieser alternative Entwurf lässt sich sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich durchführen.

- [1] Hippe, P.: Ansätze zur Windup-Vermeidung. Workshop „Theoretische Verfahren der Regelungstechnik“ in Salzburg, 25.-27.9.2023.
- [2] Hippe, P. und G. Roppenecker: Alternative observer-based compensator design for robust asymptotic disturbance rejection in view of input saturation. *Automatisierungstechnik* 2025; 73 (7): 494 - 502.

Flachheit nichtlinearer zeitkontinuierlicher Systeme mit zwei Eingängen

M. Schöberl

Institut für Regelungstechnik, Johannes Kepler Universität (JKU) Linz, Altenberger Straße
69, 4040 Linz, Tel: +43(0)732/2468-6320, E-Mail: markus.schoeberl@jku.at

In [1] und [2] wurden für den Fall einer differentiellen Differenz von $d \leq 2$ notwendige und hinreichende Bedingungen für die Flachheit nichtlinearer Systeme mit zwei Eingangsgrößen vorgestellt. Diese Resultate basieren auf zwei wichtigen strukturellen Eigenschaften nichtlinearer Systeme: einerseits, ob ein allgemeines nichtlineares System auf eine eingangs-affine (AI) Form transformierbar ist, und andererseits, ob zumindest eine partielle eingangs-affine (PAI) Form möglich ist. Ziel dieses Vortrags ist es nun, geometrische Tests, welche prüfen, ob AI- oder PAI-Formen möglich sind, genauer zu beleuchten sowie ihre Relevanz für die Flachheitsanalyse zu diskutieren.

Literatur

- [1] Gstöttner, C.; Kolar, B.; Schöberl, M.: A Finite Test for the Linearizability of Two-Input Systems by a Two-Dimensional Endogenous Dynamic Feedback, European Control Conference (ECC), pp. 970-977, 2021.
- [2] Gstöttner, C.; Kolar, B.; Schöberl, M.: Necessary and Sufficient Conditions for the Linearisability of Two-Input Systems by a Two-Dimensional Endogenous Dynamic Feedback, International Journal of Control, 96(3), pp. 800-821, 2023.

Zeitdiskrete Zustandsschätzung und Regelung auf Basis impliziter Integrationsverfahren für den magnetischen Schweberversuch

M. Mogler[†], L. Zhang[‡], P. Kotyczka[‡]

[†]Université Grenoble Alpes, Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes,
50 rue Barthélémy de Laffémas, 26902 Valence, France,
E-Mail: maximilian.mogler@lcis.grenoble-inp.fr

[‡]Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design, Munich
Institute of Robotics and Machine Intelligence (MIRMI), Lehrstuhl für Regelungstechnik,
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching, E-Mail: {le.zhang,kotyczka}@tum.de

Dass die direkte (quasi-kontinuierliche) Implementierung zeitkontinuierlich entworfener Regelgesetze in Abtastregelkreisen nur unter der Bedingung ausreichend hoher Abtastraten gut funktioniert, ist allgemein bekannt. Lässt sich aufgrund zu hoher Abtastzeit der Abtastmechanismus nicht mehr vernachlässigen, hilft die Verwendung eines Systemmodells aus einem Integrationsverfahren höherer Ordnung. In [1] wird gezeigt, wie ein zeitkontinuierliches Regelgesetz weiterverwendet werden kann, und zwar durch die Ergänzung der Regelungsstruktur um eine Einschnitt-Prädiktion der Zieldynamik mit der impliziten Mittelpunktsregel. Bei Anwendung auf mechanische Systeme erhält man gleichzeitig eine sehr praxistaugliche Schätzung der Geschwindigkeiten [2].

Der magnetische Schweberversuch ist ein bewährtes Beispiel für Fragen rund um die regelungsorientierte Modellbildung und die experimentelle Validierung von Regelungsentwürfen. Der digitale Abtastregelkreis kann mit beliebigen Abtastzeiten geschlossen werden, und aufgrund der Instabilität der einzustellenden Ruhelagen und Modellunsicherheiten (etwa durch das unstabilierte Netzteil) lässt sich gut die Robustheit der untersuchten Regelungskonzepte bewerten.

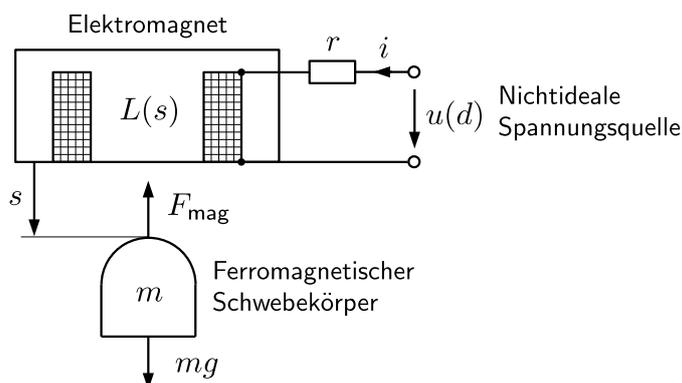


Abbildung 1: Schema und Foto des Versuchsaufbaus. Der Abstand wird durch einen Laser-Distanzsensoren gemessen und der Schwebekörper vertikal geführt, um Pendeln zu vermeiden. Im Experiment dient das Tastverhältnis d einer H-Brücke als Stellgröße.

Im Vortrag wird zunächst gezeigt, wie die zeitdiskrete Implementierung einer Zustandsrückführung über die implizite Mittelpunktsregel (als Modell mit Genauigkeit zweiter Ordnung) um die Zustandsschätzung durch einen nichtlinearen Luenberger-Beobachter erweitert werden kann. Um auch die tatsächlich wirkende Klemmenspannung als Eingangsgröße mitzuschätzen, wird der Ansatz eines Newton-Beobachters nach [3] auf das implizite Streckenmodell übertragen. Das resultierende überbestimmte Gleichungssystem

lässt sich entsprechend für diskrete Streckenmodelle höherer Ordnung, etwa aus Gauss-Legendre-Kollokation, aufstellen [4]. Die numerische Lösung entspricht dabei einem Minimierungsproblem, wie von den Beobachtern mit gleitendem Horizont bekannt [5].

Eine neue Parametrierung der vom Abstand des Schwebekörpers abhängigen Induktivität $L(s)$ der Anordnung bildet die magnetische Kraft deutlich besser über einen weiteren Arbeitsbereich ab als in früheren Arbeiten [6, 7]. Gleichzeitig läuft der Entwurf eines IDA-PBC-Reglers mit konstanten Entwurfsmatrizen ins Leere. Hier hilft ein Blick auf die Gleichungsstruktur, und Backstepping liefert eine sehr einfache Lösung, die wiederum als IDA-PBC interpretiert werden kann, mit nun abstandsabhängiger Strukturmatrix des geregelten Systems [8].

In Experimenten zeigt sich (a) die hervorragende Güte des neu identifizierten Induktivitätsmodells, die eine präzise Folgeregelung zwischen 4 mm und 20 mm Abstand des Schwebekörpers erlaubt, und (b) dass mit dem Einsatz der zeitdiskreten Beobachter höherer Ordnung Abtastraten im Bereich von 30 Hz, also der Bildwiederholrate typischer Kameras, erreicht werden können.

Literatur

- [1] Kotyczka, P.; Thoma, T. (2021): Symplectic discrete-time energy-based control for nonlinear mechanical systems. In: *Automatica* 133, S. 109842. DOI: 10.1016/j.automatica.2021.109842.
- [2] Thoma, T.; Wu, X.; Dietrich, A.; Kotyczka, P. (2021): Symplectic discrete-time control of flexible-joint robots: Experiments with two links. In: *IFAC-PapersOnLine* 54 (19), S. 1–7. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.11.046.
- [3] Moraal, P. E.; Grizzle, J. W. (1995): Observer design for nonlinear systems with discrete-time measurements. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 40 (3), S. 395–404. DOI: 10.1109/9.376051.
- [4] Mogler, M. (2022): Zeitdiskreter Beobachterentwurf für nichtlineare Systeme. Masterarbeit, TUM.
- [5] Allan, D. A.; Rawlings, J. B. (2018): Moving horizon estimation. In: *Handbook of model predictive control*, S. 99-124, Springer.
- [6] Zhang, L. (2024): Model Predictive Control and Moving Horizon Estimation for the Magnetic Levitation System. Masterarbeit, TUM.
- [7] Kotyczka, P.; Lohmann, B. (2010): Parametrierung von IDA-PBC über Zuweisung lokal linearer Dynamik. In: *at - Automatisierungstechnik* 58 (1), S. 38–48. DOI: 10.1524/auto.2010.0813.
- [8] Zhang, L.; Kotyczka, P. (2025): Sampled-Data Control using Hermite-Obreschkoff Methods with an IDA-PBC Example. In: *13th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS)*, Reykjavik. DOI: 10.48550/arXiv.2501.11495.

Zur Approximation von Operatoren im Kontext von Totzeitsystemen mittels einer Spektralmethode

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

Sobald in einem geschlossenen Regelkreis eine Totzeit $h > 0$ auftritt, wird aus einer gewöhnlichen Differentialgleichung eine Funktionaldifferentialgleichung. Schließlich muss in einem Anfangswertproblem für

$$\dot{x}(t) = A_0x(t) + A_1x(t-h), \quad A_0, A_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}, \quad (1)$$

eine Anfangsfunktion $x_0 \in C([-h, 0], \mathbb{R}^n)$ vorgegeben und fortwährend das Lösungssegment $x_t: [-h, 0] \rightarrow \mathbb{R}^n; \theta \mapsto x_t(\theta) = x(t+\theta)$ über dem vorangegangenen Totzeitintervall $[t-h, t]$ als Zustand angesehen werden. Wir betrachten das Paar aus dem Zustand $x_t(\cdot) \in C$ und dem Wert $x_t(0) = x(t) \in \mathbb{R}^n$ und verwenden die Einbettung

$$\begin{bmatrix} x_t \\ x(t) \end{bmatrix} \in C \times \mathbb{R}^n \subset L_2 \times \mathbb{R}^n =: M_2. \quad (2)$$

Die Dynamik von $\begin{bmatrix} x_t \\ x(t) \end{bmatrix}$ wird durch eine abstrakte Differentialgleichung

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_t \\ x(t) \end{bmatrix} = \mathcal{A} \begin{bmatrix} x_t \\ x(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

mit einem Operator $\mathcal{A}: M_2 \supset D(\mathcal{A}) \rightarrow M_2$ beschrieben, siehe [2]. In Anwendungsfällen, in denen im totzeitfreien Fall matrixwertige Lyapunov- oder algebraische Riccati-Gleichungen von Interesse sind, rücken folglich operatorwertige Lyapunov- oder algebraische Riccati-Gleichungen mit einer Operatorlösung $\mathcal{P}: M_2 \rightarrow M_2$ in den Fokus.

Mittels numerischer Methoden, die von partiellen Differentialgleichungen bekannt sind, können endlichdimensionale Approximationen der Operatoren erlangt werden. Spektralmethoden, wie die Legendre-Tau-Methode, approximieren zu jedem Zeitpunkt $t \geq 0$ den Zustand x_t des Systems durch ein Polynom vorgegebenen Grades [3, 1]. Das Ergebnis ist eine gewöhnliche Differentialgleichung $\dot{x}_c(t) = A_c x_c(t)$ für den Koordinatenvektor $x_c(t)$, der dieses Polynom (und damit auch das Paar aus Polynom und dessen Endpunkt) eindeutig bestimmt. Dementsprechend repräsentiert die Matrix A_c eine Approximation des Operators \mathcal{A} . Darauf basierend lassen sich zudem matrixwertige Lyapunov- [7] oder algebraische Riccati-Gleichungen [4, 6] aufstellen, deren matrixwertiges Ergebnis P_c wiederum auf eine Approximation der Operatorlösung \mathcal{P} abzielt.

Jegliche Rechnungen mit den Operatoren (z.B. Operatornormen, Berechnung adjungierter Operatoren, Operatorgleichungen) übertragen sich auf Rechnungen mit den Matrizen. Dabei ist aber Vorsicht geboten, denn die zugrundeliegenden polynomialen Basisfunktionen sind in M_2 nicht orthonormal. Zudem sind die repräsentierten Operatoren nicht nur auf polynomiale Argumente anwendbar.

Der Beitrag betrachtet Operatorapproximationen, die durch Matrizen aus der Legendre-Tau-Methode repräsentiert werden. Aufbauend auf [5] und [8, Anhang A], liegt der Schwerpunkt des Beitrags auf einer Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den Matrizen, den Operatorapproximationen und den exakten Operatoren.

Literatur

- [1] Breda, D.; Diekmann, O.; Gyllenberg, M.; Scarabel, F.; Vermiglio, R.: Pseudospectral discretization of nonlinear delay equations: New prospects for numerical bifurcation analysis. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*, 15(1):1–23, 2016.
- [2] Curtain, R.; Zwart, H.: *Introduction to Infinite-Dimensional Systems Theory*. Springer, New York, NY, 2020.
- [3] Hesthaven, J. S.; Gottlieb, S.; Gottlieb, D.: *Spectral methods for time-dependent problems*. Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- [4] Ito, K.; Teglas, R.: Legendre-tau approximation for functional differential equations part II: The linear quadratic optimal control problem. *SIAM J. Control Optim.*, 25(6):1379–1408, 1987.
- [5] Scholl, T. H.; Gröll, L.: From matrices to operators: A tensorial view on the Legendre tau method for time-delay systems. *IFAC-PapersOnLine*, im Druck, 2025. (Präsentiert auf dem 19. IFAC Workshop on Time Delay Systems in Gif-sur-Yvette, Frankreich, 30. Juni - 2. Juli 2025.)
- [6] Scholl, T. H.; Hagenmeyer, V.; Gröll, L.: Lyapunov-Krasovskii functionals of robust type and their Legendre-tau-based approximation. *IFAC-PapersOnLine*, 58(27):219–224, 2024. (Präsentiert auf dem 18. IFAC Workshop on Time Delay Systems in Udine, Italien, 24.-27. September 2024.)
- [7] Scholl, T. H.; Hagenmeyer, V.; Gröll, L.: What ODE-approximation schemes of time-delay systems reveal about Lyapunov–Krasovskii functionals. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 69(7):4614–4629, 2024.
- [8] Scholl, T. H.: *Stability in time-delay systems*. Dissertation, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, 2024.

Robustifizierung von Beobachtern für Systeme mit quasi-unbekannten Eingängen

A. Schaum†, S. Koch‡

†Lehrstuhl für Prozessanalytik, Universität Hohenheim, Garbenstr. 23, D-70599 Stuttgart, Tel: +49(0)711 459 23286, E-Mail: alexander.schaum@uni-hohenheim.de

‡Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik, Inffeldgasse 21B, A-8010 Graz, Tel: +43(0)316 873 7031, E-Mail: stefan.koch@tugraz.at

Das Problem der Robustifizierung von nominellen Beobachtern für Systeme mit quasi-unbekannten Eingängen wird diskutiert. Ein Ansatz zum systematischen Entwurf einer Robustifizierung basierend auf einer zusätzlichen Korrektur wird vorgestellt. Die Korrektur kann entweder statisch oder dynamisch erfolgen. Beide Fälle und deren Abgrenzung werden diskutiert und notwendige sowie hinreichende Bedingungen hergeleitet.

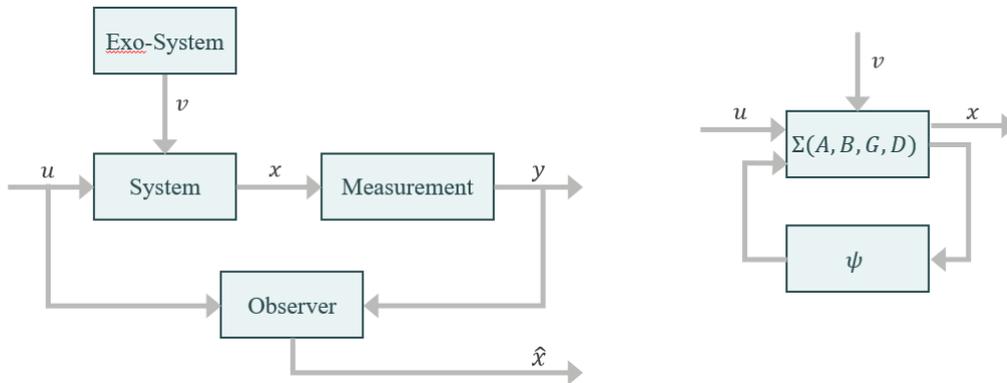


Abbildung 1: Links: Gesamtsystemstruktur, Rechts: Systemdynamik als Lur'e Verschaltung.

Hierbei werden (nichtlineare) Systeme in der spezifischen Form (siehe auch Abbildung 1 rechts)

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{G}\psi(\boldsymbol{\sigma}) + \boldsymbol{\varphi}(t, \mathbf{y}, \mathbf{u}) + \mathbf{D}\mathbf{v} \quad (1a)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{H}\mathbf{x} \quad (1b)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (1c)$$

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{S}\mathbf{v} \quad (1d)$$

betrachtet, wobei $\mathbf{x}(t) \in \mathcal{X}$ der Zustand ist und \mathcal{X} ein geeigneter Zustandsraum, $\mathbf{A} : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{X}$ ein Operator zur Beschreibung des linearen Anteils der Dynamik, $\mathbf{B} : \mathcal{U} \rightarrow \mathcal{X}$ der Eingangoperator für den bekannten exogenen Eingang $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^q$, $\mathbf{D} : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathcal{X}$ der entsprechende Eingangoperator für den (quasi-)unbekannten exogenen Eingang $\mathbf{v}(t) \in \mathbb{R}^d$, $\mathbf{G} : \Xi \rightarrow \mathcal{X}$ ein Verstärkungsoperator für den nichtlinearen Anteil $\psi : \Sigma \rightarrow \Xi$, wobei Σ, Ξ Unterräume von \mathcal{X} sind, welche gemäß dem Ausgangoperator $\mathbf{H} : \mathcal{X} \rightarrow \Sigma$ und ψ definiert sind. Der gemessene Ausgang des Systems ist durch den Operator $\mathbf{C} : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}^m$ bestimmt. Die Dynamik des Exosystems wird durch die Matrix \mathbf{S} bestimmt, welche als bekannt angenommen wird. Die Anfangsbedingung $\mathbf{v}(0)$ ist jedoch unbekannt. In der

Betrachtung wird \mathbf{S} auf solche Systeme beschränkt, bei denen der Realteil der Eigenwerte Null ist, d.h. $\mathbf{v}(t)$ kann konstant, periodisch oder polynomiell in t sein.

Basierend auf der Annahme eines Beobachters mit der Struktur

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{G}\psi(\hat{\boldsymbol{\sigma}}) + \boldsymbol{\varphi}(t, \mathbf{y}, \mathbf{u}) - \mathbf{L}(\mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{y}) \quad (2a)$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\sigma}}} = \mathbf{H}\mathbf{x} - \mathbf{N}(\mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{y}) \quad (2b)$$

wird eine zusätzliche Korrektur der Form

$$\bar{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} + \mathcal{N}\{\mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{y}\} \quad (3)$$

entworfen, wobei \mathcal{N} einen geeigneten Korrekturmechanismus darstellt, welcher entweder statisch oder dynamisch ist. Die Bedingungen an die Existenz dieses Korrekturmechanismus werden basierend auf Eigenschaften der zugehörigen Störgrößenübertragungsfunktion für das lineare Teilsystem hergeleitet.

Der Ansatz wird anhand von Beispielen für nichtlineare konzentriert-parametrische, sowie parabolische und hyperbolische verteilt-parametrische Systeme diskutiert und illustriert.

Literatur

- [1] Schaum A., Koch S., Moreno J.A.: Nonlinear quasi-unknown input observer design using dissipativity, IEEE 63rd Conference on Decision and Control (CDC), Milan, Italy, 2024, pp. 7014-7019.
- [2] Schaum A., KochS.: Nonlinear observer design for an undamped wave equation with distributed disturbance, IFAC CPDE 2025 (accepted)
- [3] Koch S., Schaum, A.: Design of quasi-unknown input observers for a class of distributed-parameter systems, Automatica, provisionally accepted, 2025.
- [4] Koch S., Schaum, A., Horn, M.: Robust boundary controller design with proportional integral observer for a linear 1D heat equation, IFAC-PapersOnline 56(2),9918-9923, 2023.

Integration Algebraischer Ableitungsschätzer in den Entwurf kaskadierter PDE-ODE-Beobachter

F. Meiners†, A. Othmane‡, J. Adamy†

†Fachgebiet Regelungsmethoden und Intelligente Systeme, Landgraf-Georg-Str. 4, 64283 Darmstadt, Tel: +49(0)6151/16-25031, E-Mail: florian.meiners@tu-darmstadt.de

‡Professur für Modellierung und Simulation technischer Systeme, Universität des Saarlandes, Campus, Geb. A 51, Zi. 1.06, 66123 Saarbrücken, Tel: +49 (0)681/302-3766, E-Mail: amine.othmane@uni-saarland.de

Nicht gemessene Zustände eines beobachtbaren linearen zeitinvarianten Systems lassen sich entweder mithilfe eines Zustandsbeobachters schätzen oder direkt aus dem Eingang, dem Ausgang und einer geeigneten Anzahl ihrer Zeitableitungen berechnen. Allerdings stellt die numerische Differentiation gemessener Signale ein schlecht gestelltes Problem dar, das äußerst anfällig für Messstörungen ist. Zudem kann bereits eine geringe Abweichung zwischen Modell und Realität die direkte Zustandsberechnung stark verfälschen. Daher eignet sich dieser Ansatz in den meisten regelungstechnischen Szenarien nicht. Zustandsbeobachter ermöglichen eine modellbasierte Schätzung mit vorgebbarer Dynamik des Schätzfehlers. Sie zeichnen sich durch eine hohe Robustheit gegenüber Messrauschen sowie durch garantierte Stabilität bei geeigneter Auslegung aus. Zudem erlauben sie eine konsistente Einbindung physikalischer Systemkenntnisse in die Schätzstrategie und bieten theoretisch fundierte Aussagen über die Konvergenz der geschätzten Zustände zu den tatsächlichen Systemzuständen. Voraussetzung hierfür ist jedoch ein hinreichend genaues mathematisches Modell des zugrunde liegenden Systems, das als Grundlage für die Beobachterausslegung dient. Im Gegensatz dazu ist die numerische Differentiation modellfrei und bietet insbesondere in datengetriebenen Anwendungen oder bei unbekannter Systemdynamik entscheidende Vorteile. Effiziente, echtzeitfähige Verfahren ermöglichen unter geeigneter Parametrierung eine präzise Schätzung nicht direkt messbarer Größen ausschließlich auf Basis von Messdaten.

Im Vortrag wird ein Verfahren zur Kombination einer speziellen Klasse numerischer Differentiationsmethoden, den algebraischen Ableitungsschätzern (z.B. [2, 3]), mit einer klassischen Ausgangsfehlerinjektion vorgestellt, das die Vorteile beider Ansätze vereint. Die Interpretation der Schätzungen algebraischer Differenzierer als Messungen von fiktiven Sensoren ermöglicht die Umformulierung des Gesamtsystems als PDE-ODE-Kaskade, für die der Beobachter aus [1] angesetzt wird. Eine solche Kombination erlaubt es, die Vorteile der modellfreien Differentiation in die Beobachterschätzung zu integrieren. Ein hybrider Ansatz kann somit zur Verbesserung der Schätzungsgüte, zur Erhöhung der Robustheit gegenüber Modellunsicherheiten und zur flexiblen Anpassung an unterschiedliche Anwendungsszenarien beitragen.

Eine Untersuchung des PDE-ODE-Beobachters wird vorgestellt und eine Reihe von Vorzügen gegenüber klassischen Ansätzen diskutiert. Die Verbesserung der Beobachtbarkeitseigenschaften des zugrundeliegenden Systems durch die fiktiven Sensoren wird bewiesen. Darüber hinaus erschließt man durch das Miteinbeziehen der Ableitungsschätzungen zusätzliche Freiheitsgrade beim Entwurf. Diese können insbesondere verwendet werden, um die Einträge der Rückführmatrix zu beeinflussen und dadurch Rauschen in der Beobachtung zu minimieren.

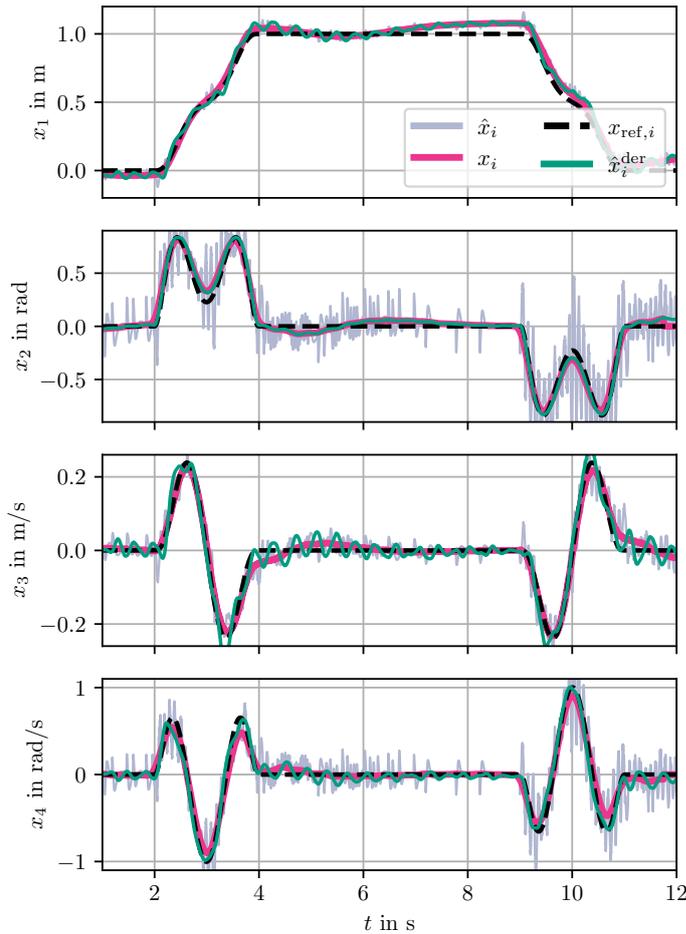


Abbildung 1: Experimentelle Ergebnisse bei Verwendung des PDE-ODE-Beobachters im geschlossenen Regelkreis für einem Verladekran. Die horizontale Position und Geschwindigkeit der Katze sind durch x_1, x_2 gegeben. Der Seilwinkel und die zugehörige Winkelgeschwindigkeit werden mit x_3 und x_4 bezeichnet (pink, rekonstruiert durch weitere Sensoren). Die geschätzten Zustände der Beobachter sind \hat{x}_i für den Luenberger-Beobachter (grau), und \hat{x}_i^{der} für den PDE-ODE-Beobachter in grün, die Referenztrajektorie in schwarz.

gewinn über den Systemzustand durch die zusätzlichen Ausgangsgrößen analytisch eindeutig quantifizieren: die zweite Ableitung der Messung entspricht gerade einem Vielfachen des nicht gemessenen Seilwinkels. Die Verwendbarkeit des Beobachters im geschlossenen Regelkreis wird experimentell validiert.

Literatur

- [1] N. Bekiaris-Liberis und M. Krstic. Lyapunov stability of linear predictor feedback for distributed input delays. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 56(3):655–660, 2010.
- [2] M. Mboup, C. Join, und M. Fliess. Numerical differentiation with annihilators in noisy environment. *Numer. Algorithms*, 50(4):439–467, 2009.
- [3] A. Othmane, L. Kiltz, und J. Rudolph. Survey on algebraic numerical differentiation: historical developments, parametrization, examples, and applications. *Int. Journal of Systems Science*, 53(9):1848–1887, 2022.

Zur Motivation der Vorteile der vorgestellten Verfahrens wird im Vortrag ein Modell vierter Ordnung eines Verladekrans betrachtet, in dem der erste und dritte Zustand jeweils die Katzposition und der Seilwinkel bezüglich geeigneter Referenzen sind. Entsprechend handelt es sich beim zweiten und vierten Zustand um die zugehörigen Geschwindigkeiten. Direkt gemessen wird aber lediglich die horizontale Lastposition, was für erhebliche Probleme beim Entwurf eines Luenberger-Beobachters sorgt.

Für eine schnelle Fehlerkonvergenz sind nämlich große Einträge in der Rückführmatrix zu wählen, die zu einer Verstärkung des Messfehlers führen. Das zeigt sich auch in den experimentellen Ergebnissen in Abbildung 1. Fasst man allerdings die Schätzungen der ersten beiden Ableitungen, die ein algebraischer Differenzierer liefert, als verzögerte Messungen zusätzlicher fiktiver Sensoren auf, so können Freiheitsgrade in der Wahl der Beobachtermatrix gezielt genutzt werden. Zudem lässt sich der Informationsgewinn über den Systemzustand durch die zusätzlichen Ausgangsgrößen analytisch eindeutig

Flachheitsbasierte Regelung hyperbolischer Mehrgrößensysteme am Beispiel des Timoshenko-Balkens

S. Schmidt¹, N. Gehring², A. Irscheid³

¹ Institut für Regelungstechnik, Johannes Kepler Universität Linz, Altenberger Straße 69, 4040 Linz, E-Mail: simon.schmidt@jku.at

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

³ Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität des Saarlandes, Campus A5 1, 66123 Saarbrücken, E-Mail: a.irscheid@lsr.uni-saarland.de

Der flachheitsbasierte Regelungsentwurf basiert bekanntlich auf der Parametrierung aller Systemgrößen durch einen flachen Ausgang. Da sich aus der Eingangsparametrierung eine Systembeschreibung in Brunovsky-Normalform oder Regelungsnormalform ableiten lässt, kann basierend auf ihr relativ direkt ein Folgeregler entworfen werden. Diese Grundgedanken treffen sowohl auf endlich- als auch unendlichdimensionale Systeme zu. Für hyperbolische Eingrößensysteme mit Raddynamik wurde die flachheitsbasierte Regelungstheorie in [4] eingeführt. Zentrales Element ist dabei die Transformation des Systems auf hyperbolische Regelungsnormalform (hRNF), in der analog zur Integratorkette im endlichdimensionalen Fall die Systemdynamik durch eine Transportgleichung beschrieben wird. Zur nicht-trivialen Erweiterung dieser Ergebnisse auf hyperbolische Systeme mit mehreren Eingangsgrößen wurden im letzten Workshop erste Ergebnisse vorgestellt. Die mittlerweile weiterentwickelten Methoden werden im Vortrag anhand eines Beispiels diskutiert: dem Timoshenko-Balken.

Unter einem Timoshenko-Balken versteht man einen Balken (z.B. in Brücken oder Gebäuden), bei dem neben ortsabhängigen Durchbiegungen, wie sie auch in der klassischen Euler-Bernoulli-Theorie auftreten, zusätzlich Schubverformungen Berücksichtigung finden. Das mathematische Modell umfasst zwei gekoppelte Wellengleichungen, wobei davon ausgegangen wird, dass am aktuierten Rand sowohl die Kraft als auch das Moment vorgegeben werden können. Diese Anordnung stellt ein typisches Beispiel für ein hyperbolisches Mehrgrößensystem dar, wofür sich in der Literatur zahlreiche Regelungsstrategien finden, wie beispielsweise die direkte Randwertvorgabe in [2], die flachheitsbasierte Folgeregelung in [1] oder der Backstepping-Ansatz in [3], der eine port-Hamiltonsche Formulierung nutzt.

Im Vortrag wird anhand des Beispiels des Timoshenko-Balken gezeigt, wie sich dessen Systemgleichungen auf hRNF transformieren und basierend darauf sehr einfach flachheitsbasierte Folgeregler entwerfen lassen. Dafür überführt zunächst eine Reihe an Transformationen das hyperbolische Mehrgrößensystem in eine für die Lösungsberechnung vorteilhafte Form. Eben diese Lösung eines Cauchy-Problems führt anschließend auf die Parametrierung der Zustands- und Eingangstrajektorien durch einen flachen Ausgang. Basierend darauf lässt sich der Normalformzustand konstruktiv definieren und die hRNF angeben. Es wird gezeigt, dass die zugehörige Transformation zwischen Original- und hRNF-Zustand invertierbar ist. Da sie explizit vom Eingang und dessen zukünftigen Werten abhängt, treten gleichfalls in der hRNF Prädiktionen des Eingangs auf. Damit kann bei der resultierenden hRNF nicht von einer Zustandsdarstellung im klassischen Sinn gesprochen werden. Die Wahl einer gewünschten Dynamik für den geschlossenen Kreis führt letztlich

direkt auf einen Folgereger, genauer auf eine quasi-statische Zustandsrückführung.

- [1] J. Becker und T. Meurer. Feedforward tracking control for non-uniform Timoshenko beam models: combining differential flatness, modal analysis, and FEM. *J. Appl. Math. Mech.*, 87(1):37–58, 2006.
- [2] J. U. Kim und Y. Renardy. Boundary control of the Timoshenko beam. *SIAM J. Contr. Optim.*, 25(6):1417–1429, 1987.
- [3] J. Redaud, J. Auriol und Y. Le Gorrec. In-domain damping assignment of a Timoshenko-beam using state feedback boundary control. In: *2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC)*, S. 5405–5410, 2022.
- [4] F. Woittennek und J. Rudolph. Controller canonical forms and flatness based state feedback for 1D hyperbolic systems. *IFAC Proceedings Volumes*, S. 792–797, 2012.

Gedanken zur Regelungsnormalform linearer hyperbolischer PDE-ODE-Mehrgrößensysteme

S. Ecklebe†, L. Mayer†, F. Woittennek†

†Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, UMIT TIROL, Eduard-Wallnöfer-Zentrum 1, Tel: ++43(0)50/86483930, E-Mail: stefan.ecklebe@umit-tirol.at

Die Steuerung und Regelung von Systemen mit örtlich verteilten Parametern (SVPs) hat eine lange Geschichte, insbesondere im Bereich der angewandten Mathematik mit funktionalanalytischen Ansätzen auf Basis der Zustandsraumtheorie sowie der optimalen Regelung. Allerdings fehlt es derzeit an einem einheitlichen Überblick über die Regelungstheorie von SVPs, obwohl in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte erzielt wurden. Insbesondere ermöglicht die Backsteppingmethode (siehe z.B. [1]) den Regelungsentwurf für eine große Klasse von Systemen innerhalb eines einheitlichen Rahmens. Eine weitere leistungsstarke Methode ist Erweiterung des Konzepts der differentiellen Flachheit auf SVPs [2], welches für den Steuerungsentwurf etabliert ist und bereits erfolgreich für den Regelungsentwurf hyperbolischer Systeme eingesetzt wurde. Trotz der unterschiedlichen Natur beider Ansätze besteht eine interessante Gemeinsamkeit: Beide eignen sich gut um bekannte normalformbasierte Entwurfstechniken für lineare und nichtlineare konzentriertparametrische Systeme auf SVPs zu adaptieren. Präziser ausgedrückt lassen sich Zustandsrückführungen und Beobachter direkt aus den zugehörigen Regler- bzw. Beobachternormalformen ableiten (siehe z.B. [3] für den Eingrößenfall). Zusammenfassend ermöglicht dies einen einfachen Entwurf von beobachterbasierten Folgeregelungen und öffnet den Weg zu einem neuen allgemeinen Normalformansatz für die Behandlung vieler SVP-Klassen sowohl aus der Backstepping-, als auch Flachheitsperspektive innerhalb des gleichen Rahmens, welcher im Fokus des PDEForm-Projekts steht.

Der Vortrag beginnt mit der Wiederholung vorhandener Ergebnisse zu Regelungsnormalformen für ODE-Mehrgrößen- als auch hyperbolische PDE-ODE-Eingrößensysteme. Auf Basis dieser werden die strukturellen Eigenschaften einer Regelungsnormalform für hyperbolische PDE-ODE-Mehrgrößensysteme motiviert. Der Hauptteil widmet sich den notwendigen Schritten zur Einführung eines Normalformzustands, die anhand eines einfachen Beispiels nachvollzogen werden. Der Vortrag schließt mit einer Einordnung der Ergebnisse sowie der Benennung offener Forschungsfragen in Hinblick auf nichtlineare ODE-Randsysteme.

Literatur

- [1] Krstic, M.; Smyshlyaev, A.: Boundary Control of PDEs — A Course on Backstepping Designs, SIAM, Philadelphia 2008.
- [2] Rudolph, J.: Flatness based control of distributed parameter systems, Shaker, Aachen, 2003.
- [3] Gehring, N.; Irscheid, A.; Deutscher, J.; Woittennek, F.; Rudolph, J.: Control of distributed-parameter systems using normal forms: an introduction, at - Automatisierungstechnik, 71(8), 624-646, 2023.

Observer-based Funnel Heading Control with Prescribed Settling Time for Ships: Addressing Rudder Dynamics and Saturation

Reza Shahnazi†, Tobias Hahn†, Martin Kurowski†, Torsten Jeinsch†

†University of Rostock, Institute of Automation, Germany, Tel: +49(0)381 498-7727,

E-Mail: reza.shahnazi@uni-rostock.de

This work presents an observer-based funnel heading control strategy for surface ships, designed to address the challenges of guaranteeing transient and steady-state performance under practical constraints such as unmeasurable heading rate, environmental disturbances, and rudder actuator saturation and dynamics. The content is based on a recently accepted IFAC conference paper and is extended here with further insights and adaptation to more complex and general nonlinear systems.

Using a backstepping-based funnel control framework, the proposed approach introduces a novel formulation for achieving prescribed transient and steady-state behavior while guaranteeing predetermined settling time. A state observer is proposed to estimate both the heading rate and the actual rudder angle from heading angle measurement alone. Additionally, environmental disturbances, modeled as unknown sinusoidal signals, are actively estimated and compensated for within the control loop.

The rudder actuator is modeled as a first-order lag with amplitude saturation. This nonlinearity is particularly relevant in practical ship control, where actuation limits must be considered. The method employs dynamic surface control to avoid derivative computations of virtual controls and defines performance funnels for all error variables. This ensures that the errors remain within pre-specified thresholds and achieve the desired settling time, even in the presence of mismatched uncertainties and limited actuation capability.

Closed-loop stability, accounting for the coupled dynamics of the ship, actuator, and observer subsystems, is rigorously established using Lyapunov-based analysis. It is shown that all closed-loop signals are uniformly ultimately bounded and that the tracking and intermediate errors remain confined within their respective performance funnels.

The proposed method is validated through numerical simulations using the well-known “Esso München” ship model under substantial environmental disturbances. The simulation results demonstrate satisfactory heading and heading rate tracking performance, adaptive disturbance rejection, and accurate estimation of unmeasured states, even in the presence of actuator saturation and dynamics.

In addition to presenting the core methodology, this talk will explore potential extensions of the proposed approach to more general and complex nonlinear systems, encompassing a broad class of practical applications, including mechanical, electrical, and maritime systems.

Keywords: Heading control, Funnel control, Prescribed performance, Rudder saturation, Rudder dynamics, Observer design

Neural ODE based Control of Multi-Functional Heatpump Systems

S. Buck†, B. Alt†, F. Heber†, L. Mikelsons‡

†Robert Bosch GmbH, 71272 Renningen, E-Mail: simon.buck3@de.bosch.com

‡Lehrstuhl für Mechatronik, Universität Augsburg, E-Mail: lars.mikelsons@uni-a.de

Battery electric vehicles (BEVs) are one of the most promising candidates for green individual mobility. On the one hand, lithium-ion-based batteries provide an efficient storage capability for energy from renewable resources, on the other hand, electric drives are known for their remarkable overall energy efficiency, especially when compared to internal combustion engines.

However, thermal management of BEVs is a hard challenge since the electric drive should not exceed a peak temperature limit at any time. At the same time, battery lifetime and passenger comfort require the temperatures of the high-voltage battery and the cabin to respect corresponding lower and upper limits. Since all actions for heating or cooling come with a cost in terms of electric energy consumption and therefore an unwanted impact on the remaining driving range, we are seeking intelligent solutions to fulfill the requirements above while minimizing the overall electric energy consumption. On the system design level, the introduction of fully integrated multi-functional heat pumps has been a key enabler to bring battery electric vehicles to the next level. Recent advances on predictive algorithms help on the software side to fully exploit the potential of these new complex system designs (see [1]).

In addition to the challenge of minimal electric energy consumption, we are looking for further improvements in terms of performance (e.g., reduced time for cabin heating or cooling) or system cost efficiency (e.g., use of waste heat recovery), enabling unique selling points for Bosch as a system provider. However, to solve these challenges with optimal control methods, a mathematical description of the system dynamics is required. Due to complex nonlinearities in the system, i.e., the refrigerant circuit and heat exchangers, a description with classical differential equations is difficult, especially since the model has to allow for low computational efforts in online optimization. Therefore, a data-based approach using Neural ODEs (see [2]) is used in our work to model the temperature dynamics of the various components. This technique uses a neural network NN to approximate the right-handed side of the differential equation, i.e.

$$\dot{\mathbf{x}} = NN(\mathbf{x}, \mathbf{u}).$$

This allows for the approximation of complex dynamics that are difficult to capture in equations, while still allowing the use of classical methods from control engineering and optimization, such as numerical integration with well-known numerical algorithms, e.g., Euler-forward:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \Delta t \cdot N(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \quad \forall k = 0, \dots, N - 1.$$

Our goal is to obtain an accurate prediction

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_0 \quad \mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{x}_N]$$

of the component temperatures over a time horizon

$$\mathbf{t} = [t_0 \quad t_1 \quad t_2 \quad \cdots \quad t_N]$$

for a specific control input

$$\mathbf{U} = [\mathbf{u}_0 \quad \mathbf{u}_1 \quad \mathbf{u}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{u}_{N-1}].$$

For this prediction to be accurate enough, the training data must contain the input space of the later evaluation. The DOE must therefore be carefully planned to cover this input space sufficiently. In the next step, the trajectories are used for training the neural network. For this purpose, a feedforward neural network (FNN) is used, although there are also more advanced architectures in the literature [3]. Since there is a large number of parameters for the training process, a hyperparameter analysis must be performed. This allows, for example, a suitable number of layers or neurons per layer to be determined. In addition, various methods such as batch learning, learning rate adaptation, or early stopping are used to improve the training process and must be calibrated for an accurate model.

In our work, we exemplarily investigate the optimal control of the cabin temperature. In a simple model with only one thermal mass T_{Cab} , three input variables significantly influence the temperature of the cabin. These are the ambient temperature T_{Amb} , as well as the inlet temperature T_{In} and blower speed u_{Blwr} of the air into the cabin at the outlet of the HVAC system.

$$\dot{T}_{\text{Cab}} = NN(T_{\text{Cab}}, T_{\text{In}}, \dot{m}_{\text{air}}, T_{\text{Amb}}).$$

After a successful training, the model is used in an optimizer to compute the control input signals \mathbf{U}_{Opt} . The most important goal of the control strategy is to keep the cabin temperature within a temperature window. This is achieved by switching between two different system modes. In Mode 1, the cabin can be heated with a constant inlet temperature T_{In} . In Mode 2, the blower is switched off, i.e., $u_{\text{Blwr}} = 0$, so no energy is transferred. The goal of the optimization is to find the switching times to switch between modes 1 and 2, whereby the temperature window must not be violated and energy consumption shall be minimized. In order to compensate for prediction errors of the learned model, the optimizer is used in an MPC scheme with a shorter horizon and fewer mode switches. In our talk, we will discuss the possibilities and challenges of the entire pipeline. This includes a suitable data collection, the training process, and the application of a NeuralODE in an optimizer/MPC scheme.

Literatur

- [1] Buck, S.; Alt, B.; Heber, F.; Mikelsons, L.: Energy Efficiency Optimization for Electric Vehicles with multi-functional Heat Pump, accepted for 11th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, Eindhoven, Netherlands, 2025.
- [2] Legaard, C. M. et al.: Constructing Neural Network-Based Models for Simulating Dynamical Systems, CoRR, 2021.
- [3] Aka, J.; Brunnemann, J.; Eiden, J.; Speerforck, A.; Mikelsons, L.: Balanced Neural ODEs: nonlinear model order reduction and Koopman operator approximations, accepted for ICLR, Singapore, 2025

Identifikation und Optimalsteuerung zum transversalen Teilen von ultra-kalten Bose Gasen

N. Würkner †, A. Deutschmann-Olek †, A. Kugi †

†Automation and Control Institute, TU Wien, Gusshausstraße 27-29, 1040 Wien, Österreich,
E-Mail: wuerkner@acin.tuwien.ac.at

Ultra-kalte Atome sind eine etablierte experimentelle Systemklasse der quantenphysikalischen Forschung. Eine zentrale Rolle spielen dabei Bose-Einstein Kondensate (engl. *Bose-Einstein Condensates*, BECs), in denen eine Wolke von Atomen sich kollektiv wie ein einzelnes, makroskopisches Quantenobjekt verhält. Abseits der Grundlagenforschung sind diese Systeme beispielsweise für Präzisionsmessungen als Quantensensoren, z.B. als Materiewellen-Interferometer [3], von großem Interesse.

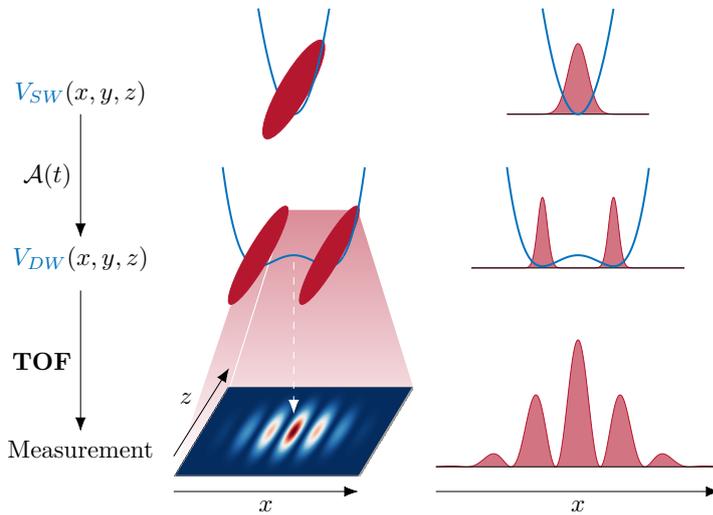


Abbildung 1: Schematische Darstellung des experimentellen Ablaufs. Das Kondensat wird in einem quadratischen Potential vorbereitet. Durch Veränderung des Eingangs $\mathcal{A}(t)$ geht das Potential dynamisch zu einem Doppelpotenzial über. Nach Deaktivierung des Potentials interagieren die Atome im freien Fall und das resultierende Interferenzmuster kann gemessen werden. In der linken Spalte dargestellt als dreidimensionale Schematik und in der rechten als reduzierte, quasi-eindimensionale Dichteverteilung.

baticity [4]. Um dies zu ermöglichen muss typischerweise ein Optimalsteuerungsproblem gelöst werden [5, 6].

Die Manipulation dieser Kondensate stellt eine interessante Herausforderung in der Regelungstechnik dar. Eine typische Plattform zur Manipulation von BECs sind *Atom Chips*, welche ein magnetisches Potential erzeugen, das präzise geformt und gesteuert werden kann. Ein grundlegender Prozess in vielen BEC-Experimenten ist das transversale Teilen einer länglichen Atomwolke, welches durch zeitlich veränderliche Potentialkonfigurationen erreicht werden kann [2]. Derartige Teilen regt typischerweise unerwünschte Dynamiken des Kondensats an. Um diese Anregungen zu unterdrücken kann entweder das Potential sehr langsam (adiabatisch) verändert werden oder der gewünschte Zustand durch Nutzung der inhärenten nichtlinearen Dynamik des Systems mittels gezielter Steuerung erzeugt werden, ein sogenannter *shortcut to adiabaticity*.

In diesem Vortrag stellen wir einen strukturierten, modellbasierten Ansatz vor um ein BEC mit minimaler Anregung im Experiment transversal zu teilen [7]. Wir entwickeln ein reduziertes Modell des magnetischen Potentials und der kollektiven Dynamik des Kondensates, welches mit Hilfe von optimal gewählten Messungsszenarien zuverlässig kalibriert werden kann. Basierend auf diesem kalibrierten Modell leiten wir optimale Eingangstra-

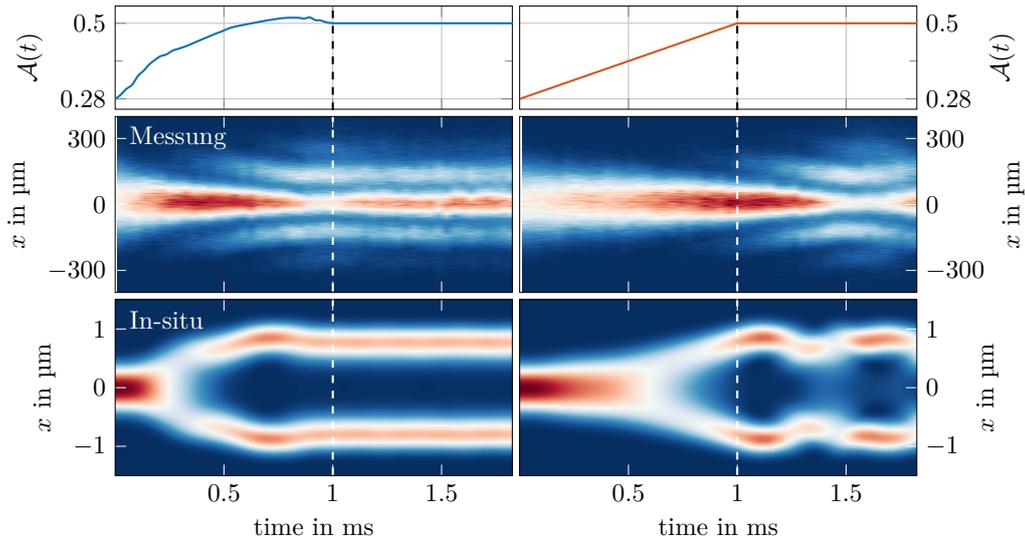


Abbildung 2: Optimale (links) und naive (rechts) Transition mit Eingangstrajektorie (oben), gemessenes Interferenzmuster (mitte), simulierte in-situ Dichte (unten).

jektoren her, welche Anregungen minimieren, siehe Abbildung 2, und bis ans Geschwindigkeitslimit der verfügbaren Aktuierung zuverlässig funktionieren. Abschließend präsentieren wir experimentelle Ergebnisse zum transversalen Teilen als auch zur Eliminierung von bekannten Anregungen. Hierbei betrachten wir sowohl den Einfluss auf die klassische kollektive Dynamik des Kondensates als auch dessen Quantenfluktuationen.

Literatur

- [1] J. Reichel and V. Vuletic, Atom Chips, Wiley, 2011.
- [2] S. Hofferberth, I. Lesanovsky, B. Fischer, J. Verdu, and J. Schmiedmayer, Radiofrequency-dressed-state potentials for neutral atoms, Nature Phys 2, 710, 2006
- [3] T. Berrada, S. van Frank, R. Bücker, T. Schumm, J.-F. Schaff, and J. Schmiedmayer, Integrated Mach–Zehnder interferometer for Bose–Einstein condensates, Nat Commun 4, 2077, 2013
- [4] A. del Campo and M. G. Boshier, Shortcuts to adiabaticity in a time-dependent box, Sci Rep 2, 1, 2012
- [5] S. Van Frank, M. Bonneau, J. Schmiedmayer, S. Hild, C. Gross, M. Cheneau, I. Bloch, T. Pichler, A. Negretti, T. Calarco, S. Montangero, Optimal control of complex atomic quantum systems, Sci Rep 6, 34187, 2016
- [6] J.-F. Mennemann, D. Matthes, R.-M. Weishäupl, and T. Langen, Optimal control of Bose–Einstein condensates in three dimensions, New Journal of Physics 17, 113027, 2015
- [7] N. Würkner, Y. Kuriatnikov, K. G. Kumaran, M.V. Ramana, T. Zhang, J. Schmiedmayer, M. Prüfer, A. Kugi, A. Deutschmann-Olek, Optimal control and identification methods for the splitting of Bose-Einstein condensates, in preparation

Surrogate Modeling in the Automotive Industry

J. Fehr *, J. Kneifl*, N. Fahse*, et. al

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

With around 2.2 million jobs, the automotive industry is Germany’s largest industrial value-adding sector. A modern vehicle is a highly complex mechatronic system that increasingly acts and reacts autonomously.

Simulation and modeling play a key role in bringing such systems to the road in a cost-efficient, safe, and regulation-compliant way. While conventional simulation pipelines have enabled physically grounded crash analysis for decades, it is surrogate models—i.e., efficient approximations of complex simulations—that now facilitate rapid prototyping, design optimization, and real-time onboard evaluation. This is particularly relevant in holistic approaches to vehicle safety, where the entire chain—from occupant simulations for injury prediction and comfort analysis to full-vehicle crash simulations—is considered. Below, we present three application scenarios that we have explored in recent years, partly in collaboration with partners from the automotive industry:

Model Reduction for NVH Analysis of Flexible Multibody Systems

For analyzing the NVH behavior (Noise, Vibration, Harshness) of flexible multibody systems, automated model reduction is essential. Techniques such as the Craig-Bampton method, Krylov subspace approaches, or modal reduction allow nonlinear flexible bodies to be efficiently integrated into simulations, see [2]. Over the years we developed our in-house software Morembs [1] to cluster those methods, build interfaces to commercial software solutions and export those models.

Structural Optimization in Crash Simulations

Crash simulations pose a unique set of challenges for surrogate modeling due to their highly nonlinear and transient dynamics, non-continuous boundary conditions (e.g., contact and impact), and limited accessibility of underlying simulation models, which are often embedded in commercial software. These aspects call for tailored surrogate modeling approaches. In the context of data-driven modeling, latent space embeddings have proven effective in capturing the complex dynamics of high-fidelity simulations in a compact, low-dimensional, and information-rich representation [6]. Such representations ease the learning process and improve generalization for downstream tasks using black-box machine learning models.

To further exploit the structure of crash data, we applied geometric deep learning techniques—such as graph neural networks—that can leverage spatial correlations inherent in irregular and mesh-based simulation outputs. Multi-scale and hierarchical learning schemes enable efficient encoding of both local (micro-scale) and global (macro-scale)

features, mitigating common limitations of neural network architectures such as spectral bias. The effectiveness is shown for the structural response of a simplified crash scenario which could reduce computational costs by up to four orders of magnitude [7].

Surrogate Models as a Bridge Between Simulation Models in Human Body Models

In addition to pure computational acceleration, surrogate models are an enabling technology for the transfer of properties between different simulation models. In many scenarios, multiple models represent the same physical system but differ in key aspects such as evaluation time, fidelity, interpretability, and how they handle complex features like contact mechanics. By learning to predict relevant output quantities in a representation compatible with the target model, a surrogate model can serve as a proxy—effectively bridging the gap between these diverse simulations.

This allows for the transfer of useful characteristics from one model to another. Moreover, surrogate models provide differentiable metamodels that replicate the input-output behavior of complex simulations. This not only makes them useful for integration with gradient-based algorithms but also significantly reduces computation time during the online phase. Thanks to these capabilities, surrogate models are particularly well-suited for tasks such as optimization (e.g., optimal control), inverse problems (e.g., parameter identification), and sensitivity analysis. For example, within the EMMA4Drive project, we used such surrogates to learn human–seat interactions in autonomous driving scenarios, enabling us to develop a human body model capable of predicting human-like motion of occupants [3, 4, 5].

References

- [1] Fehr, J.; Grunert, D.; Holzwarth, P.; Fröhlich, B.; Walker, N.; Eberhard, P.: chap. Morembs—A Model Order Reduction Package for Elastic Multibody Systems and Beyond, pp. 141–166. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [2] Lohmann, B.; Bechtold, T.; Eberhard, P.; Fehr, J.; Rixen, D.J.; Varona, M.C.; Lerch, C.; Yuan, C.D.; Rudnyi, E.B.; Fröhlich, B.; Holzwarth, P.; Grunert, D.; Meyer, C.H.; Rutzmoser, J.B.: Model Order Reduction. Volume 3: Applications. chap. Model Order Reduction in Mechanical Engineering. Berlin: De Gruyter, 2020.
- [3] Fahse, N.; Harant, M.; Obentheuer, M.; Linn, J.; Fehr, J.: Towards Using Active Learning Methods for Human-Seat Interactions To Generate Realistic Occupant Motion. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 24. May, 2024.
- [4] Huynh, M. G.H.; Fahse, N.; Kneifl, J.; Linn, J.; Fehr, J.: Multi-Fidelity Surrogate Model for Representing Hierarchical and Conflicting Databases to Approximate Human-Seat Interaction. IFAC-PapersOnLine, Vol. 59, Nr. 1, pp. 337–342, 2025. 11th Vienna International Conference on Mathematical Modelling MATHMOD 2025.
- [5] Obentheuer, M.; Fahse, N.; Harant, M.; Kleer, M.; Kempter, F.; Reinhard, R.; Roller, M.; Björkenstam, S.; Fehr, J.; Linn, J.: EMMA4Drive: A Digital Human Model

for Occupant Simulation in Dynamic Driving Maneuvers. In ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics, Lisbon, Portugal, 2023.

- [6] Kneifl, J.: Data-driven Surrogate Modeling of Structural Dynamical Systems via Latent Space Representations, Bd. XX von Dissertation, Schriften aus dem Institut für Technische und Numerische Mechanik der Universität Stuttgart. Düren: Shaker Verlag, 2025.
- [7] Kneifl, J.; Fehr, J.; Brunton, S.L.; Kutz, J.N.: Multi-hierarchical surrogate learning for explicit structural dynamical systems using graph convolutional neural networks, Computational Mechanics, Vol. 75, pp. 1115-1135, 2025.
- [8] Hay, J.: A Surrogate Model-enhanced Simulation Framework for Safety Performance Assessment of Integrated Vehicle Safety Systems. Dissertation, Schriften aus dem Institut für Technische und Numerische Mechanik der Universität Stuttgart, Vol. 75. Aachen: Shaker Verlag, 2022.

Dynamic Digital Twins for Adaptive Feed-Forward Control in CNC Robotics

P. Rodegast[†], **D. Pfeifer**[‡], **J. Gesell**[†], **J. Fehr**[†]

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

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

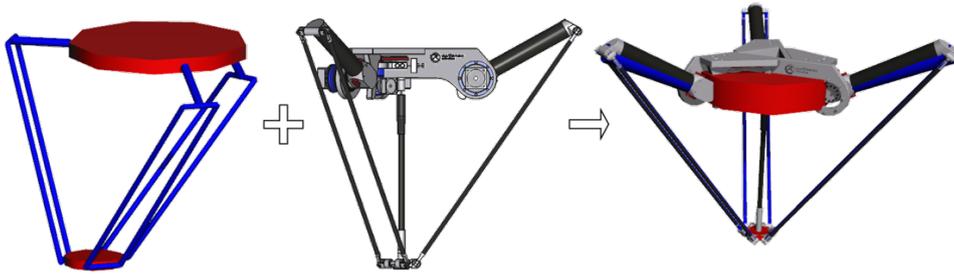


Figure 1: Digital Twin of the Delta Robot (right), consisting of kinematic model (left) and CAD model (center) used for collision detection and visualization.

The adoption of robotics has become increasingly essential for industries grappling with a shortage of skilled labor. Automation not only addresses workforce challenges but also provides significant economic advantages, as highlighted in [1] and [2]. Especially CNC-controlled pick-and-place and material handling applications demand high positioning accuracy, low tracking error, and adaptability to variable payloads and robot configurations. Traditionally, digital twin models used during virtual commissioning (VC) are discarded after deployment due to their limited physical fidelity. These models typically provide only logical and kinematic representations of the robot, offering basic collision detection via bounding box approximations but lacking the dynamic behavior needed for high-precision control in real-world operation.

In this work, we present an extended digital twin framework that upgrades these pre-existing virtual commissioning models by adding a fully parametric dynamic layer. The enhanced twin supports real-time model-based feedforward control and is capable of adapting to changes in payload and contact states during robot operation. This makes it possible to continue using the digital twin not only during early system integration but also as an active component of online control throughout the machine’s lifecycle as previously shown in [3].

The dynamic models are generated in a script-based, modular fashion using the virtual commissioning platform, allowing users to easily adjust system parameters or switch between different robot configurations. As a proof of concept, a parallel delta robot is implemented (see Fig. 1). It serves as a foundational template, with the long-term goal of establishing a library of parametric robot models usable across different manufacturing systems. A key innovation in the presented method is the integration of a collision detection mechanism that transitions from a purely protective function to a source of real-time payload detection. Once a workpiece is grasped, the system calculates its geometric

and inertial properties based on the object’s shape and density. The resulting payload mass is then automatically incorporated into the robot’s equations of motion, allowing the feedforward control to adjust its torque predictions accordingly.

This dynamic adaptation leads to a significant reduction in tracking error, especially in high-inertia cases where conventional control systems struggle due to unmodeled payload dynamics. The improvement is most evident during transitions between free motion and contact, such as during grasping or precise insertion tasks. Our approach demonstrates that digital twins need not be discarded post-commissioning; instead, by using the established interface from [4] they can be enhanced and maintained as part of the operational control infrastructure.

References

- [1] Dauth, W., Findeisen, S., Suedekum, J., Woessner, N., 2021. The adjustment of labor markets to robots. *Journal of the European Economic Association* 19, 3104–3153. <http://dx.doi.org/10.1093/jeea/jvab012>
- [2] Graetz, G., Michaels, G., 2018. Robots at Work. *The Review of Economics and Statistics* 100, 753–768. https://doi.org/10.1162/rest_a_00754
- [3] Pfeifer, D., Fauser, S., Scheifele, C., Fehr, J., 2024. Reusage of extended digital twins from virtual commissioning for dynamics-based trajectory planning in cnc controlled robotics, in: *International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM)*, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74482-2_18
- [4] Pfeifer, D., Scheid, J., Kneifl, J., & Fehr, J. (2023). An improved development process of production plants using digital twins with extended dynamic behavior in virtual commissioning and control – *Simulation@Operations*. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 23, e202300225. <https://doi.org/10.1002/pamm.202300225>

GRAMPC-(D/S): Effiziente Software für die (verteilte/stochastische) nichtlineare modellprädiktive Regelung

Andreas Völz, Knut Graichen

Lehrstuhl für Regelungstechnik, Cauerstr. 7, 91058 Erlangen, E-Mail: andreas.voelz@fau.de

GRAMPC [græmp'si:] (die Abkürzung steht für „GRAdient based MPC“) ist eine Software zur nichtlinearen modellprädiktiven Regelung basierend auf dem projizierten Gradientenverfahren [1]. Der Algorithmus zeichnet sich durch sehr niedrigen Rechenaufwand pro Iteration, wenig Speicherbedarf und geringe Code-Komplexität aus. Dies ermöglicht die echtzeitfähige modellprädiktive Regelung von hochdynamischen mechatronischen Systemen auch mit schwacher Hardware wie z.B. elektronischen Steuergeräten.

In Version 2.0 wurde das Gradientenverfahren mit einer erweiterten Lagrange-Methode kombiniert, um auch allgemeine nichtlineare Beschränkungen systematisch berücksichtigen zu können [2]. Die Effizienz im Sinne von niedriger Rechenzeit und hoher Lösungsqualität wurde in Benchmark-Vergleichen mit ACADO und VIATOC gezeigt. GRAMPC ist in C programmiert und verfügt über Schnittstellen zu C++, Matlab, Simulink und Python (neu in v2.3) sowie eine umfassende Dokumentation.

GRAMPC-D ist eine Software zur verteilten modellprädiktiven Regelung (DMPC) [3]. Durch den modularen Aufbau können mit einer Problembeschreibung sowohl das zentrale als auch das verteilte Problem gelöst werden, wobei letzteres wiederum auf einem Rechner oder per TCP-Kommunikation auf mehreren Rechnern umgesetzt werden kann. Die verteilte Optimierung erfolgt entweder mit dem ADMM- oder einem sensitivitätsbasierten Algorithmus, wobei die unterlagerten lokalen Optimierungsprobleme jeweils mit GRAMPC gelöst werden. GRAMPC-D ist in C++ programmiert und verfügt über eine Python-Schnittstelle.

GRAMPC-S ist eine Software zur stochastischen modellprädiktiven Regelung (SMPC) [4], mit der probabilistische Unsicherheiten in den Anfangszuständen, den Parametern und normalverteiltes Prozessrauschen berücksichtigt werden können. Mit verschiedenen Propagationsverfahren wie z.B. der Unscented Transformation oder der Polynomial Chaos Expansion wird das stochastische Problem durch ein deterministisches Problem approximiert, welches dann wiederum mit GRAMPC effizient gelöst werden kann. Außerdem werden Gaußprozesse zur Approximation unbekannter Teile der Dynamik nativ unterstützt. GRAMPC-S ist in C++ programmiert und kann über eine S-Function auch in Simulink eingebunden werden.

Im Rahmen der Software-Session werden die drei Pakete zunächst überblicksartig vorgestellt. Anschließend werden ausgewählte Funktionen anhand von Simulationsbeispielen praktisch demonstriert. Bei Interesse kann die Software auch auf dem eigenen Rechner ausprobiert werden. In diesem Fall empfiehlt es sich, bereits vorab einen Compiler für C/C++ zu installieren. Code und Dokumentation findet man bei sourceforge.net/projects/grampc und bei github.com/grampc.

Literatur

- [1] Bartosz Käpernick und Knut Graichen. The gradient based nonlinear model predictive control software GRAMPC. In: Proc. of European Control Conference (2014), S. 1170–1175.
- [2] Tobias Englert, Andreas Völz, Felix Mesmer, Sönke Rhein und Knut Graichen. A software framework for embedded nonlinear model predictive control using a gradient-based augmented Lagrangian approach (GRAMPC). In: Optimization and Engineering 20.3 (2019), S. 769–809.
- [3] Daniel Burk, Andreas Völz und Knut Graichen. A modular framework for distributed model predictive control of nonlinear continuous-time systems (GRAMPC-D). In: Optimization and Engineering 23.2 (2022), S. 771–795.
- [4] Daniel Landgraf, Andreas Völz und Knut Graichen. A software framework for stochastic model predictive control of nonlinear continuous-time systems (GRAMPC-S). In: Optimization and Engineering (2025).

Teilautomatisierte Erstellung formaler Wissensrepräsentation für interaktive Aufbereitung regelungstechnischer Inhalte

Julius Fiedler†, Carsten Knoll‡, Klaus Röbenack†

†Institut für Steuerungs- und Regelungstheorie, TU Dresden, E-Mail: julius.fiedler@tu-dresden.de

‡Institut für Grundlagen der Elektrotechnik, TU Dresden, E-Mail: carsten.knoll@tu-dresden.de

Die Disziplin der Regelungstechnik zeichnet sich durch ein breites Spektrum mathematischer Methoden und eine Vielzahl heterogener Anwendungsdomänen aus. Diese Vielfalt erschwert den systematischen Wissenstransfer, sowohl innerhalb des Fachgebiets, als auch in angrenzende Anwendungsbereiche. Ein vielversprechender Ansatz zur Bewältigung dieser Herausforderung besteht in der formalen Erschließung und maschinenlesbaren Repräsentation des regelungstechnischen Wissens, um darauf aufbauend den Einsatz von Assistenzsystemen zu ermöglichen. Während in den Lebenswissenschaften vergleichbare Konzepte – etwa in Form von Gen- und Protein-Datenbanken – seit vielen Jahren etabliert sind, existieren in der Mathematik und den Ingenieurwissenschaften bislang nur wenige entsprechende Umsetzungen [1, 2].

Für die formale Darstellung regelungstechnischen Wissens wurde das Framework „IRK - Imperative Representation of Knowledge“ [3] entwickelt, mit welchem detaillierte Ontologien erzeugt werden können. Dieser Ansatz bietet durch die imperative (d. h. direkt in ausführbarem Programmcode formulierte) Darstellung eine deutlich größere Ausdruckstärke im Vergleich zu üblichen deskriptiven Technologien wie OWL oder RDF. Für eine nützliche Anwendung muss eine solche Ontologie einerseits mit Inhalt gefüllt werden, d. h. sie muss mit formalem Wissen angereichert werden, andererseits müssen geeignete Zugriffswege auf dieses Wissen bereitgestellt werden.

In diesem Vortrag wird zunächst gezeigt, wie der Prozess der Wissensformalisierung unter Nutzung von vertrauenswürdigen Quellen teilautomatisiert werden kann. Anschließend wird beispielhaft an einem Auszug aus [4] demonstriert, wie das verarbeitete Wissen für das bessere Verständnis regelungstechnischer Sachverhalte aufbereitet werden kann, indem die Originalquelle zu einer interaktiven Webseite erweitert wird.

Literatur

- [1] The MORwiki Community. MORwiki - Model Order Reduction Wiki. <https://modelreduction.org>
- [2] Conrad, T.O.F., Ferrer, E., Mietchen, D. et al. Making Mathematical Research Data FAIR: Pathways to Improved Data Sharing. *Sci Data* 11, 676 (2024).
- [3] Knoll, C.; Fiedler, J.; Ecklebe, S. Imperative Formal Knowledge Representation for Control Engineering: Examples from Lyapunov Theory. *Machines* 2024, 12(3):181.
- [4] K. Röbenack, Nichtlineare Regelungssysteme: Theorie und Anwendung der exakten Linearisierung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [5] Fiedler, J.; Knoll, C. Statement Formalizer (2025), GitHub Repository. <https://github.com/fkr4eng/stafo>

— M-M.E.S.S.-3.2 —

The “Matrix Equations, Sparse Solvers” toolbox for MATLAB[®] and GNU Octave

J. Saak§

§ Max Planck Institute for Dynamics of Complex Technical Systems, Sandtorstr. 1, 39106 Magdeburg, Tel: ++49(0)391/6110216, E-Mail: saak@mpi-magdeburg.mpg.de

M-M.E.S.S. provides low rank solvers for large scale symmetric matrix equations with sparse or sparse + low rank coefficients. The main focus is on differential and algebraic Riccati equations appearing in control and model order reduction, as well as algebraic Lyapunov equations for, e.g., balanced truncation.

The underlying dynamical system may be governed by ordinary differential equations of first or second order or structured proper differential-algebraic equations (DAEs) that allow for implicit index reduction.

The solvers philosophy is to always work on the implicitly linearized (for second order systems) and/or implicitly projected (in the DAE case) matrix equations. That means, the implicit Lyapunov or Riccati equation is always of the form known for a standard first-order ODE, that may have a non-identity but invertible E matrix,

$$\begin{aligned} E\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \\ y &= Cx(t) + Du(t). \end{aligned}$$

In close relation to the predecessor **LyaPack**, we use user-supplied functions that implement the actions of the system matrices E and A in multiplication and (shifted) solves. We provide those functions for standard state-space systems, second-order systems, structured DAEs of index 1 and 2, as well as second-order DAEs of indices 1, 2 and 3.

Recent additions have especially made the Riccati solvers more powerful. We now provide direct support for the most general LQR Riccati equations of the form

$$0 = A^T X E + E^T X A + C^T Q C - (E^T X B + S) R^{-1} (B^T X E + S^T),$$

with Q , R , and S the weight matrices from the quadratic cost functional. Allowing indefinite R , we can now also solve the equations required for model order reduction using

Positive real balancing

$$\begin{aligned} 0 &= A P E^T + E P A^T + (E P C^T - B)(D + D^T)^{-1} (E P C^T - B)^T \\ 0 &= A^T Q E + E^T Q A + (E^T Q B - C^T)(D + D^T)^{-1} (E^T Q B - C^T)^T \end{aligned} \quad (\text{PRARE})$$

Bounded real balancing

$$\begin{aligned} 0 &= A P E^T + E P A^T + B B^T + (E P C^T + B D^T)(I - D D^T)^{-1} (E P C^T + B D^T)^T \\ 0 &= A^T Q E + E^T Q A + C^T C + (E^T Q B + C^T D)(I - D^T D)^{-1} (E^T Q B + C^T D)^T \end{aligned} \quad (\text{BRARE})$$

Linear-quadratic Gaussian balancing

$$\begin{aligned}
 0 &= APE^\top + EPA^\top + BB^\top - (EPC^\top + BD^\top)(I + DD^\top)^{-1}(EPC^\top + BD^\top)^\top \\
 0 &= A^\top QE + E^\top QA + C^\top C - (E^\top QB + C^\top D)(I + D^\top D)^{-1}(E^\top QB + C^\top D)^\top
 \end{aligned}$$

(LQGARE)

Additionally, we have refactored the code to be more extensible and readable, and our test setup to allow for more energy-efficient software development. We have deprecated the support for model order reduction, moving all development of those routines to the MORLAB package, which since version 6.0 now supports sparse systems using M-M.E.S.S. as its solver backend.

Über die Parameteridentifikation im geschlossenen Kreis und die dafür optimale Eingangsplanung

A. Schaum†, A. Lepsien†, T. Lundt†

†Lehrstuhl für Prozessanalytik, Universität Hohenheim, Garbenstr. 23, D-70599 Stuttgart,
Tel: +49(0)711 459 23286, E-Mail: alexander.schaum@uni-hohenheim.de

In diesem Beitrag wird das Problem der gleichzeitigen Zustands- und Parameteridentifikation betrachtet. Spezifisch werden hierbei sowohl die grundlegenden Systemeigenschaften als auch anwendungsspezifische Fragestellungen diskutiert. Hierzu wird die Systemklasse betrachtet, welche durch Modelle der Form

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{p})u, & t > 0, \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 & (1) \\ y_i &= h_i(\mathbf{x}) + v_i, & i = 1, \dots, m, t \geq 0 & (2) \end{aligned}$$

dargestellt werden kann. Hierbei stellt $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^{n_x}$ den Zustand, $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^{n_p}$ den unbekannt Parametervektor, $t \geq 0$ die Zeit, \mathbf{f}, \mathbf{g} hinreichend oft bzgl. ihrer Argumente differenzierbare Vektorfelder im \mathbb{R}^{n_x} , und y_i die i -te Messung entsprechend der Ausgangsfunktion $h_i : \mathbb{R}^{n_x} \rightarrow \mathbb{R}$ dar. Es wird von additivem, mittelwertfreiem weißem Messrauschen $v_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_i^2)$ ausgegangen.

Die Lösung der Differentialgleichung kann entsprechend durch eine Funktion $\phi : [0, \infty) \times \mathbb{R}^{n_x} \times \mathbb{R}^{n_p} \rightarrow \mathbb{R}^{n_x}$ beschrieben werden als $\mathbf{x}(t) = \phi(t, \mathbf{x}_0, \mathbf{p})$, sodass auch der Ausgang als Funktion von \mathbf{p} verstanden werden kann, gemäß $\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\phi(t, \mathbf{x}_0, \mathbf{p}))$. Es wird angenommen, dass die Systemgleichungen so definiert sind, dass alle Parameter positiv sind, sodass intrinsisch ein positiver Schätzer für die Parameter verwendet wird.

Besondere Aufmerksamkeit erhält die Diskussion der strukturellen Beobachtbarkeits- und Identifizierbarkeitseigenschaften, sowie die Frage nach einer optimalen Eingangsplanung. Hierzu wird die Maximierung des Informationsgehaltes in der Messung analysiert, welcher anhand der zugehörigen Fischerinformationsmatrix

$$\mathcal{F}(\mathbf{p}, T) = \int_0^T \frac{\partial \mathbf{h}(\phi(t, \mathbf{x}_0, \mathbf{p}))}{\partial \mathbf{p}} \mathbf{R}^{-1} \frac{\partial \mathbf{h}(\phi(t, \mathbf{x}_0, \mathbf{p}))}{\partial \mathbf{p}} dt \quad (3)$$

quantitativ erfasst wird (\mathbf{R} stellt die Kovarianzmatrix des Messrauschens dar). Verschiedene Maße um den Informationsgehalt zu quantisieren werden verglichen. Hinsichtlich der Eingangsoptimierung im geschlossenen Kreis wird eine modellprädiktive Optimierung in Kombination mit einem geeigneten Zustands- und Parameterschätzer vorgestellt. Anwendungsszenarien aus thermischen Prozessen, Diffusions-Konvektions-Reaktionssystemen, sowie gekoppelten Oszillatoren runden die Diskussion ab.

Literatur

- [1] Lundt, T.N., Lepsien, A., Feketa, P., Meurer, T., Schaum, A.: Parameter estimation in adaptively coupled Kuramoto oscillators, IFAC J3C (accepted), 2025.
- [2] Lepsien, A., Kügler, P., Schaum, A.: Optimal input design for joint state and parameter estimation for a class of nonlinear systems, IEEE Access, under Review, 2025.

Systeme mit reversiblen und irreversiblen Kopplungen: Beschreibung durch Bond-Graphen und eine spezielle GENERIC-Formulierung

P. Kotyczka†, P. Betsch‡

†Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design, Munich Institute of Robotics and Machine Intelligence (MIRMI), Lehrstuhl für Regelungstechnik, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching, E-Mail: kotyczka@tum.de

‡Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mechanik, Otto-Ammann-Platz 9, 76131 Karlsruhe, E-Mail: peter.betsch@kit.edu

Für eine thermodynamisch konsistente Modellbeschreibung multiphysikalischer Systeme mit reversiblen und irreversiblen Kopplungen müssen sich sowohl der erste (Energieerhaltung) als auch der zweite (Entropieerzeugung) Hauptsatz der Thermodynamik in der Modellstruktur und den daraus abgeleiteten numerischen Schemata abbilden.

Ausgehend von den Port-Hamiltonschen (PH) Systemen, in denen die Systemdynamik von der Gesamtenergie (Hamiltonschen) H des Systems abgeleitet wird, wurden unterschiedliche Ansätze vorgeschlagen, wie irreversible Energiewandlungen im Modell berücksichtigen werden. Beispiele sind irreversible PH-Systeme [1], Port-Thermodynamische Systeme, die auf einer Untermannigfaltigkeit des thermodynamischen Phasenraums beschrieben sind [2] oder die Betrachtung auf Basis der Exergie [3].

Eine noch längere Geschichte haben Formulierungen wie metriplektische Systeme [4, 5] oder GENERIC¹ [6], bei denen neben der Energie E die Entropie S explizit als Generator der Systemdynamik auftritt. Die Systemgleichungen sind dabei additiv aus reversiblen und irreversiblen Anteil zusammensetzt. Eine spezielle GENERIC-Formulierung nach [7], hier dargestellt für geschlossene Systeme,

$$\dot{x} = \underbrace{M_S L_0 M_S^\top}_{=L} \nabla E(x) + \underbrace{M_E K_0 M_E^\top}_{=K} \nabla S(x)$$

mit $L = -L^\top$, $K = K^\top \geq 0$ sowie den Nichtinteraktions-Bedingungen $L \nabla S = K \nabla L = 0$, erlaubt durch die Transformationsmatrizen M_E bzw. M_S die freie Wahl der thermodynamischen Zustandsvariablen (Entropie, innere Energie, Temperatur). Auf Basis von GENERIC lassen sich z. B. strukturerhaltende Integrationsverfahren mit verschiedenen Erhaltungseigenschaften für gekoppelte Probleme ableiten [8].

Ziel des Vortrags ist, am Beispiel eines magnetisch gekoppelten, thermo-visko-elastischen Modellproblems zu zeigen, wie sich die spezielle GENERIC-Formulierung systematisch aus dem Bond-Graphen [9] des Systems herleiten lässt. Das Modellproblem hat dabei eine Struktur, wie sie auch aus der FE-Diskretisierung entsprechender verteilter Probleme hervorgeht. Weiterhin werden die Bezüge zu den anderen o. g. Formulierungen aufgezeigt und die Berücksichtigung von Toren für den Fall offener Systeme illustriert.

Literatur

- [1] Ramirez, H.; Maschke, B.; Sbarbaro, D. (2013): Irreversible port-Hamiltonian systems: A general formulation of irreversible processes with application to the CSTR. In:

¹General Equation for Non-Equilibrium Reversible-Irreversible Coupling

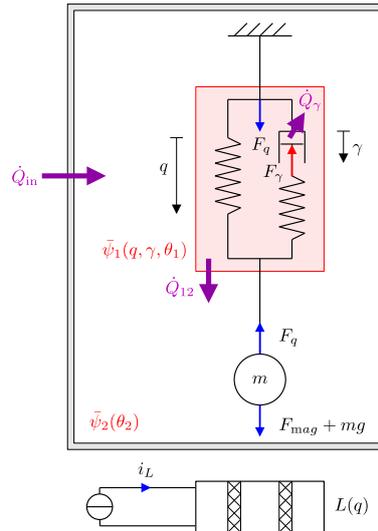


Abbildung 1: Schema des Modellproblems: Ein ferromagnetischer Körper, der über ein viskoelastisches Federelement aufgehängt ist, wird magnetisch aktuiert. Wärmeströme zwischen den thermischen Subsystemen und der Umgebung sind durch die violetten Pfeile angedeutet.

Chemical Engineering Science 89 (0), S. 223–234. DOI: 10.1016/j.ces.2012.12.002.

- [2] van der Schaft, A. (2023): Geometric modeling for control of thermodynamic systems. In: *Entropy* 25 (4), 577. DOI: 10.3390/e25040577.
- [3] Lohmayer, M.; Kotyczka, P.; Leyendecker, S. (2021): Exergetic port-Hamiltonian systems: Modelling basics. In: *Mathematic and Computer Modelling of Dynamical Systems* 27 (1), S. 489–521. DOI: 10.1080/13873954.2021.1979592.
- [4] Kaufman, A. N. (1984): Dissipative Hamiltonian systems: A unifying principle. In: *Physics Letters A* 100 (8), S. 419–422. DOI: 10.1016/0375-9601(84)90634-0.
- [5] Morrison, P. J. (1986): A paradigm for joined Hamiltonian and dissipative systems. In: *Physica D: Nonlinear Phenomena* 18 (1-3), S. 410–419. DOI: 10.1016/0167-2789(86)90209-5.
- [6] Grmela, M.; Öttinger, H. C. (1997): Dynamics and thermodynamics of complex fluids. I. Development of a general formalism. In: *Physical Review E* 56 (6), S. 6620–6632. DOI: 10.1103/PhysRevE.56.6620.
- [7] Mielke, A. (2011): Formulation of thermoelastic dissipative material behavior using GENERIC. In: *Continuum Mechanics and Thermodynamics* 23, S. 233–256. DOI: 10.1007/s00161-010-0179-0
- [8] Betsch, P.; Schiebl, M. (2020): GENERIC-based formulation and discretization of initial boundary value problems for finite strain thermoelasticity. In: *Computational Mechanics* 65 (2), S. 503–531. DOI: 10.1007/s00466-019-01781-5.
- [9] Paynter, H. M. (1961): *Analysis and Design of Engineering Systems*. MIT Press.

Modellierung forminstabiler Gebinde für die virtuelle Inbetriebnahme eines roboterbasierten Handhabungssystems

M. Wehmeier^{1*}, S. Hain¹, M. Hagedorn², D. Pfeifer³, O. Sawodny¹

¹ Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart, Waldburgstr. 19, 70563 Stuttgart

² Premium Robotics GmbH, Maybachstr. 11, 70771 Leinfelden-Echterdingen

³ ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Gropiusplatz 10, 70563 Stuttgart

* Tel: +49 711 68566296, E-Mail: wehmeier@isys.uni-stuttgart.de

Der zunehmende Fachkräftemangel im Lebensmitteleinzelhandel führt zu einem wachsenden Bedarf an Automatisierungslösungen. Die große Produktvielfalt stellt dabei eine zentrale Herausforderung dar. Die Inbetriebnahme eines roboterbasierten Handhabungssystems ist mit einem erheblichen Zeit- und Personalaufwand verbunden, da für jedes neue Produkt umfangreiche Feldversuche durchgeführt werden müssen. Durch die Möglichkeit einer virtuellen Inbetriebnahme lässt sich der Versuchsaufwand deutlich reduzieren. In diesem Beitrag wird ein echtzeitfähiger Modellierungsansatz für die roboterbasierte Handhabung forminstabiler Gebinde vorgestellt. Die Simulation umfasst eine Kollisionserkennung, eine Approximation der Kontaktkräfte und ein Modell für die Gebindedynamik. Abbildung 1 zeigt die Gegenüberstellung eines Laborversuchs und die Animation der entsprechenden virtuellen Inbetriebnahme.

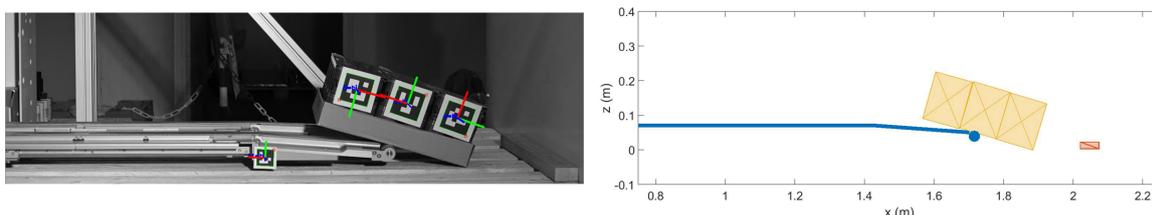


Abbildung 1: Gegenüberstellung eines Laborversuchs (links) und einer Animation der entsprechenden virtuellen Inbetriebnahme (rechts).

Die Beschreibung der Gebindedynamik basiert auf einer Zerlegung der forminstabilen Gebinde in ein Starrkörpersystem, wobei die Segmentierung und die Freiheitsgrade die erwartete Gebindeverformung vorgeben. Um Echtzeitfähigkeit sicherzustellen, wird die Topologie des Mehrkörpersystems auf offene kinematische Ketten beschränkt. Gelenke, die kinematische Schleifen verursachen, werden freigeschnitten und durch die entstehenden Schnittkräfte ersetzt. Die Gebindeoberfläche wird als Punktwolke approximiert, um die Kollisionserkennung zu vereinfachen. Für den Greifer und die Umgebung wird eine implizite Darstellung gewählt, wobei die zugrundeliegenden Funktionen die vorzeichenbehaftete euklidische Distanz zur jeweiligen Oberfläche beschreiben [1]. Entsteht eine Kollision, werden auf Grundlage dieser Darstellungsformen relevante Informationen wie die Kollisionstiefe und -richtung berechnet. Die Kontaktkräfte werden mit Hilfe eines dissipativen Kontaktmodells approximiert [2]. Es stellt einen linearen Zusammenhang zwischen Kollisionstiefe und Normalkraft her und wird durch ein dynamisches Reibmodell ergänzt, das auf Coulomb-Reibung basiert [3]. Die Kräfte werden zunächst für jeden Kontaktpunkt einzeln berechnet. Nach der Bilanzierung bezüglich des jeweiligen Massenschwerpunkts werden die resultierenden Kräfte und Momente in der Gebindedynamik berücksichtigt.

Die Starrkörper werden über Feder-Dämpfer-Elemente gekoppelt, um die Gebindesteifigkeit und die Materialdämpfung einstellen zu können. Die unbekannt Modellparameter werden im Rahmen einer Parameteridentifikation auf Basis experimenteller Messdaten bestimmt. Hierfür werden ausgewählte Oberflächenpunkte des Gebindes mit ArUco-Markern ausgestattet und ihre Bewegung kamerabasiert erfasst, siehe Abbildung 1 [4]. Die so ermittelten Markerposen dienen als Referenz für eine numerische Optimierung der Modellparameter, die mit Hilfe eines genetischen Algorithmus durchgeführt wird.

Ein Vorteil des vorgestellten Modellierungsansatzes ist die einfache Kollisionserkennung. Durch die Diskretisierung der Gebindeoberfläche werden komplexe nichtlineare Effekte, wie die Zu- und Abnahme der Kontaktfläche bei nicht-kongruenten Oberflächen, implizit berücksichtigt. Zudem können Modellgenauigkeit und Rechenaufwand in gewissen Grenzen bedarfsgerecht skaliert werden. Eine zuverlässige Erkennung von Punkt- und Linienkontakten erfordert jedoch eine feine Diskretisierung, wodurch der Rechenaufwand quadratisch ansteigt. Darüber hinaus führt der Diskretisierungsfehler zu Unstetigkeiten in der berechneten Kontaktkraft.

Literatur

- [1] Arriola-Rios, V. E. et al.: Modeling of Deformable Objects for Robotic Manipulation: A Tutorial and Review, *Frontiers in Robotics and AI* , Vol. 7, 2020
- [2] Flores, P.; Lankarani, H. M.: *Contact Force Models for Multibody Dynamics* , Springer International Publishing, 2016
- [3] Marques, F.; Flores, P.; Pimenta Claro, J. C.; Lankarani, H. M. : A survey and comparison of several friction force models for dynamic analysis of multibody mechanical systems, *Nonlinear Dynamics* , Vol. 86, No. 3, 2016
- [4] Bradski, G.: *The OpenCV Library*, *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, 2000

Eine Variante zur numerischen Integration von Einbettungssystemen

D. Gerbet, K. Röbenack

TU Dresden, Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie, Georg-Schumann-Straße 7A,
 Tel: ++49(0)351/463 33940, E-Mail: {daniel.gerbet1,klaus.roebenack}@tu-dresden.de

Für die numerische Integration von Systemen in Zustandsdarstellung existieren eine Vielzahl von numerischen Methoden. Diese gehen hauptsächlich auf die Arbeiten von Runge [4] und Kutta [3] zurück und wurden weiterentwickelt, beispielsweise durch Fehlerabschätzung und die darauf beruhenden Schrittweitensteuerung [1]. Nach ähnlichem Prinzip funktionieren exponentielle Integratoren [2].

Diese Verfahren haben gemein, daß eine Darstellung des Systems durch unabhängige Koordinaten benötigt wird. Solche Koordinaten sind jedoch nicht immer auf einfache Weise zu finden und können unter Umständen nur lokal existieren. Von daher ist es wünschenswert, die Verfahren auf Systeme der Form

$$\dot{x} = f(x) \tag{1a}$$

$$0 = g(x) \tag{1b}$$

mit Koordinaten $x \in \mathcal{M} \subseteq \mathbb{R}^n$, die den Zwangsbedingungen $g(x) = 0$ genügen, zu übertragen. In dieser Form muß das Vektorfeld f mit den Zwangsbedingungen kompatibel sein, das heißt, die Ableitung von g entlang des Vektorfeldes f muß für alle $x \in \mathcal{M}$ verschwinden.

Integriert man die Differentialgleichung (1a) numerisch ohne die Berücksichtigung der Zwangsbedingungen (1b), so wird der numerische Fehler dazu führen, daß letztere verletzt werden. Daher ist eine Korrektur erforderlich. Hier soll eine Variante vorgestellt werden, die nicht in das Integrationsschema selbst eingreift:

Sei G die Jacobimatrix der Abbildung g aus (1b), die für alle $x \in \mathcal{M}$ vollen (Zeilen-)Rang besitzt. Dann gilt, wie bereits erwähnt, für alle $x \in \mathcal{M}$ die Beziehung

$$G(x)\dot{x} = G(x)f(x) = 0,$$

die aus der Zeitableitung von (1b) folgt. Diese Bedingung wird nicht verletzt, wenn

$$G(x)\dot{x} = -Kg(x) \tag{2}$$

mit positiv definiten Matrix K gefordert wird. Allerdings kann (2) im gesamten eingebetteten Raum $\mathbb{R}^n \ni \mathcal{M}$ gelten. Die Forderung (2) impliziert die asymptotische Stabilität von (1b), was leicht anhand der Lyapunov-Funktion $x \mapsto g^T(x)g(x)$ ersichtlich ist.

Wir nehmen nun eine LQ-Zerlegung

$$G = (L, 0)Q = (L, 0) \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{pmatrix}$$

der Matrix G (punktweise) vor. Dabei ist L eine untere Dreieckmatrix und Q eine orthogonale Matrix. Damit lautet (2)

$$LQ_1\dot{x} = -Kg(x)$$

und legt die Ableitung senkrecht zum Tangentialraum fest. Im Tangentialraum selbst müssen die korrekten Geschwindigkeiten

$$(0, I)Q\dot{x} = Q_2 f(x)$$

eingehalten werden. Diese beiden Gleichungen lassen sich gemeinsam nach \dot{x} auflösen und man erhält

$$\dot{x} = Q_1^T L^{-1} K g(x) + Q_2^T Q_2 f(x)$$

und unter Ausnutzung von

$$Q_1^T Q_1 + Q_2^T Q_2 = I$$

die günstigere Form

$$\dot{x} = f(x) - Q_1^T (L^{-1} K g(x) + Q_1 f(x)). \quad (3)$$

Aus dieser wird auch der Korrekturterm im Vergleich zu (1a) offenkundig.

Die gewöhnliche Differentialgleichung (3) kann nun mittels gebräuchlichen Verfahren integriert werden. Es ist lediglich das korrigierte Vektorfeld zu verwenden, für dessen Auswertung eine LQ-Zerlegung der Jacobimatrix G vorzunehmen ist. Dies bedeutet, daß die Jacobimatrix G der Zwangsbedingung explizit implementiert werden muß. Benötigt das Integrationsverfahren selbst die Jacobimatrix des Vektorfeldes, so muß hier zudem die zweite Ableitung der Zwangsbedingung bemüht werden.

Es kann auch vorkommen, daß die Formulierung von redundanten Zwangsbedingungen vorteilhaft ist. In dem Fall wäre der konstant niedrigere Rang der Jacobimatrix zu beachten.

Literatur

- [1] E. Fehlberg. Klassische Runge-Kutta-Formeln vierter und niedrigerer Ordnung mit Schrittweiten-Kontrolle und ihre Anwendung auf Wärmeleitungsprobleme. *Computing*, 6:61–71, 1970.
- [2] M. Hochbruck und A. Ostermann. Exponential Integrators. *Acta Numerica*, 19:209–286, 2010.
- [3] W. Kutta. Beiträge zur näherungsweise Integration totaler Differentialgleichungen. *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, 46:435–453, 1901.
- [4] C. Runge. Ueber die numerische Auflösung von Differentialgleichungen. *Mathematische Annalen*, 46:167–178, 1895.

Vergleich von Datenreduktionskriterien für Online-Gaußprozesse zur Systemidentifikation

Thore Wietzke, Knut Graichen

Lehrstuhl für Regelungstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Cauerstraße 7, 91058 Erlangen, Tel: +49(0)9131/85-27419, E-Mail: Thore.Wietzke@fau.de

Die Verwendung von Gaußprozessen (GP) erfreut sich großer Beliebtheit für die Systemidentifikation von dynamischen Systemen. Ihr Vorteil besteht in ihrer nativen stochastischen Modellierung, wodurch die Unsicherheiten während und nach der Systemidentifikation berücksichtigt werden können. Für große Datenmengen sind sie dagegen nicht geeignet, da durch eine Matrixinversion die Rechenzeit mit $\mathcal{O}(N^3)$ skaliert. Hierfür existieren dünn besetzte Approximationen, auch Sparse GP genannt, die durch die Verwendung von induzierten Datenpunkten die Rechenzeitskalierung auf $\mathcal{O}(NM^2)$ reduzieren können [1].

Für die Online-Systemidentifikation sind selbst Sparse GP nicht geeignet, da kontinuierlich neue Datenpunkte integriert werden müssen. Ein häufiger Ansatz definiert ein maximales Budget N_{max} an Datenpunkten, die die Rechenzeitanforderungen für die Anwendung des Gaußprozesses einhält [2]. Zunächst werden neue Datenpunkte anhand eines Hinzufügekriteriums ausgewählt. Danach werden alte Datenpunkte mit den neuen Datenpunkten nach gewissen Reduktionskriterien ersetzt.

In der Literatur existieren für die Reduktion diverse Kriterien, die bisher nicht systematisch miteinander verglichen wurden [2, 3, 4]. In diesem Vortrag wird daher ein Vergleich der Reduktionskriterien durchgeführt und ihre Eignung anhand von Benchmark-Funktionen und Datensätzen zur Systemidentifikation behandelt [5]. Die Evaluation findet im Rahmen der Offline-Datenreduktion bzw. -selektion und innerhalb eines Online GPs statt. Hieraus lassen sich Empfehlungen für die Wahl des Reduktionskriteriums ableiten.

Literatur

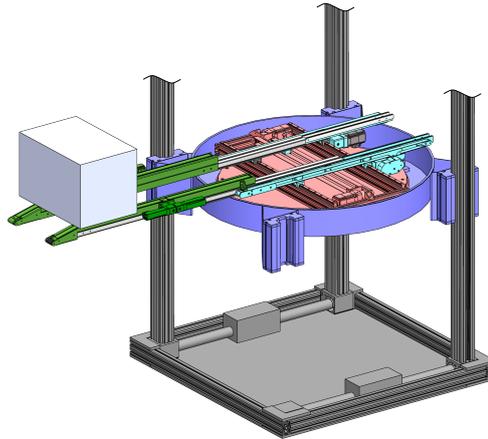
- [1] Quiñonero-Candela, J.; Rasmussen C.-E.: A Unifying View of Sparse Approximate Gaussian Process Regression, *Journal of Machine Learning Research*, vol. 6, pp. 1939-1959, 2005.
- [2] Nguyen-Tuong, D.; Peters, J.: Incremental online sparsification for model learning in real-time robot control, *Neurocomputing*, vol. 74, no. 11, pp. 1859-1867, 2011.
- [3] Petelin, D.; Grancharova, A.; Kocijan, J.: Evolving Gaussian Process Models for Prediction of Ozone Concentration in the Air, *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 33, pp. 68-80, 2013.
- [4] Bergmann, D.; Buchholz, M.; Niemeyer, J.; Remele, J.; Graichen, K.: Gaussian Process Regression for Nonlinear Time-Varying System Identifikation, *IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 3025-3031, 2018.
- [5] Wietzke, T.; Graichen, K.: Comparison of Data Reduction Criteria for Online Gaussian Processes, *arXiv preprint arXiv:2508.10815*, 2025.

Quantitative Assessment of Sensor Accuracy for Estimating Vertical Deflection in Telescopic Robotic Rails

J. Gesell†, S. Hoschek†, P. Rodegast†, J. Scheid‡, J. Fehr†

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

‡Robomotion GmbH, Maybachstraße 11, 70771 Leinfelden-Echterdingen, E-Mail: jonas.scheid@premium-robotics.com



Digital twins of mechanical systems are increasingly establishing themselves as a key technology in industrial automation, particularly in the context of Industry 4.0 [1]. The continuously mapping of the system behavior into the extended dynamic description within a virtual environment opens up opportunities for state monitoring, performance optimization, fault prediction and the implementation as well as validation of advanced control strategies [2]. In the domain of robotics employing telescopic rails for extended reach in automated picking operations, the practical realization of such digital representations critically depends on accurately predicting load-induced deflections. Achieving this requires not only high-fidelity structural models, but also the correct identification of system parameters and a continuous supply of measurement data that provides accurate real-time information on vertical displacement in order to maintain grasp accuracy, avoid prolonged cycle times, and prevent failures [3]. Despite this critical role, deflection sensing in industrial contexts is still frequently overlooked or reduced to coarse approximations, which do not provide the data quality needed to support high-fidelity digital twins.

To address this gap, we present a quantitative assessment of sensor systems for estimating vertical deflection in telescopic robotic rails under varying operational loads and different rail extensions. Four sensing modalities are investigated, spanning a broad spectrum of performance and cost: a high-precision laser Doppler vibrometer [4], a Bosch laser distometer [5], a low-cost MPU6050 inertial measurement unit (IMU) and the integrated accelerometer-gyroscope system of an iPhone 14. Each sensor system is systematically evaluated in terms of measurement precision, absolute accuracy, noise robustness and practical deployability within industrial environments. Since inertial sensors such as the iPhone and the MPU6050 provide angular rather than displacement data, their signals

are interpreted through an extended state observer that integrates angular velocity and acceleration according to an equivalent Bernoulli-Euler beam representation of the telescopic rail.

In addition to this analytical observer-based approach, an alternative model derived directly from CAD geometry and validated via finite element simulations is implemented, allowing us to cross-check the suitability of model-driven transformations.

Experimental trials are conducted on a roller-gripper robotic picking platform under representative payload conditions. Each sensor modality is benchmarked against the laser Doppler vibrometer, serving as the reference standard, and their performance is compared with respect to bias, noise characteristics, and responsiveness to different payloads. The results reveal distinct trade-offs between achievable accuracy, integration effort, and cost: while the laser Doppler vibrometer delivers sub-millimeter precision, its line-of-sight requirement limits deployability. Conversely, the MPU-based sensing, despite lower absolute accuracy, offers surprising robustness, establishing itself as a viable low-cost fallback for moderate-precision tasks. By systematically analyzing these sensing solutions within a unified mechanical and estimation framework, the study demonstrates that reliable vertical deflection monitoring need not be confined to high-end laboratory instruments, but can instead be realized through an appropriate combination of model-based estimation and cost-effective sensing, ultimately paving the way for more resilient and adaptive automation in industrial robotics.

Literatur

- [1] Tao, F. and Qi, Q.: Make more digital twins. Nature vol. 573, 2019, doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02849-1>.
- [2] Hartmann, D.: Real-Time Digital Twins. Zenodo, 2021. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5470479>.
- [3] Hoschek, S.; Rodegast, P.; Gesell, J.; Scheid, J.; Fehr, J.: Effiziente Modellierung flexibler Robotersysteme zur Echtzeitsimulation am Beispiel eines Leichtbauroboters. at - Automatisierungstechnik, 2025. doi: <https://doi.org/10.18419/opus-16330>.
- [4] Polytec Homepage, OFV-5000 vibrometer controller and OFV-534 laser emission unit, <https://www.polytecstore.fr>, last visited: 2025/08/08.
- [5] Bosch Homepage, GLM40 distometer, <https://www.bosch-professional.com/eg/en/products/glm-40-0601072900>, last visited: 2025/08/08.

Operatorinferenz angewandt auf restringierte mechanische Systeme

Y. Filanova*, **J. Saak†**, **I. Pontes Duff‡**, **P. Benner‡**

* Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg, Deutschland,
Tel: ++49(0)391/6110 345, E-Mail: filanova@mpi-magdeburg.mpg.de

† Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg, Deutschland,
Tel: ++49(0)391/6110 216, E-Mail: saak@mpi-magdeburg.mpg.de

‡ Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg, Deutschland

Mechanische Systeme mit Zwangsbedingungen kommen, beispielsweise bei der Modellierung von Robotern und anderen Mehrkörpersystemen, in vielen Anwendungen vor. In diesem Fall wird die Bewegung durch ein System von differenziell-algebraischen Gleichungen (DAE) beschrieben, oft mit großen und dünn-besetzten Systemmatrizen. Da die Rechenressourcen in der Regel stark begrenzt sind, hat die Problemdimension dabei einen großen Einfluss auf die Effektivität und Durchführbarkeit von Simulationen für die Systemanalyse, Optimierung, Regelung und Steuerung. Daher streben wir ein vereinfachtes Ersatzmodell mit wenigen Zustandskomponenten, d. h. Freiheitsgraden, an, das die Bewegung und andere wichtige Eigenschaften des ursprünglichen hochdimensionalen DAE-Modells genau genug darstellen kann.

Klassische Methoden zur Modellordnungsreduktion nutzen die Systemmatrizen intrusiv, um die Projektion des hochauflösenden Modells auf einen niedrigdimensionalen Unterraum zu konstruieren. In der Praxis sind die dynamischen Gleichungen aber häufig ein unzugänglicher oder schwer zugänglicher Teil proprietärer Softwareprodukte. Es besteht also Bedarf an äquivalenten modellfreien Reduktionsansätzen, um reduzierte Modelle nur unter Verwendung der direkt zugänglichen Simulationsdaten zu generieren.

Dieser Beitrag präsentiert eine Anwendung der nicht-intrusiven Operatorinferenzmethode (OpInf) auf propere DAE-Systeme mit Index-2 und -3. Berücksichtigend, dass es für propere DAEs eine ODE-Realisierung auf der sogenannten versteckten Mannigfaltigkeit gibt, liefert das OpInf-Optimierungsproblem direkt eine ODE-Realisierung des gegebenen DAE-Systems im reduzierten Unterraum. Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass die reduzierten Systemmatrizen direkt aus den DAE-Lösungsschnappschüssen (in komprimierter Form) identifiziert werden. Die Stabilität und Interpretierbarkeit des reduzierten Modells wird durch Erzwingen der symmetrisch positiv definitiven Struktur der Systemoperatoren unter Verwendung der semidefiniten Programmierung gewährleistet. Die numerischen Resultate demonstrieren die Implementierung der vorgeschlagene Methodik für verschiedene Mechanische Systeme mit Zwangsbedingungen, die unter variierenden Belastungsbedingungen evaluiert wurden.

Literatur

- [1] Benner, P.; Filanova, Y.; Pontes Duff, I.; Saak, J.: Application of operator inference to reduced-order modeling of constrained mechanical systems, arxiv:2507.05472, math.DS, 2025.

Rethinking the Engineering Design Task: Tolerance Optimization via Adaptive Learning and Semi-Infinite Programming

Julia Stecher[†], Lothar Kiltz[†], Knut Graichen[‡]

[†]ZF Friedrichshafen AG, Löwentaler Str. 20, 88046 Friedrichshafen, E-Mail: {lothar.kiltz, julia.stecher}@zf.com

[‡]Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Cauerstr. 7, 91058 Erlangen, E-Mail: knut.graichen@fau.de

This work presents a unified framework for robust design and tolerance optimization that integrates adaptive learning techniques with semi-infinite programming to address complex engineering design tasks involving parametric uncertainties and manufacturing tolerances. A novel formulation of robust optimization is introduced, which generalizes existing approaches by identifying the largest feasible tolerance set within a design space defined by black-box performance measures. The feasibility of these tolerance sets is evaluated using Gaussian process (GP) models, which are iteratively refined during the optimization process. New candidate designs are selected through constrained optimization, leveraging semi-infinite programming to efficiently explore the design space [4].

In contrast to the state-of-the-art nominal design optimization, which aims at finding an isolated point, the tolerance optimization method accounts for the production tolerances, aging or wear, which can lead to significant variations from the nominal design and costly rejects [1, 3, 6, 2]. The presented GP-based adaptive learning approach enables the direct solution of the associated semi-infinite programs, enhancing sample efficiency and avoiding multi-stage problems in tolerance optimization.

The proposed method is applied to two distinct engineering problems. First, it is employed for the automatic tuning of nonlinear model-predictive controllers under parametric uncertainty, demonstrating superior performance compared to expert manual tuning. Second, the framework is employed to the simultaneous optimization of the nominal design and manufacturing tolerances for a proportional electromagnetic actuator. The goal is to ensure consistent force characteristics across all tolerance combinations while minimizing the number of finite element method (FEM) simulations.

A comparison to the state-of-the-art tolerance optimization reveals that the simultaneous optimization of nominal values and tolerances yields feasible designs with reasonable computational overhead, whereas separate optimization of the nominal values and the tolerances often leads to specification violations. Overall, this research highlights the effectiveness of combining learning-based models with semi-infinite programming for robust and efficient design optimization under uncertainty [5].

Literatur

- [1] Hans-Georg Beyer und Bernhard Sendhoff. Robust optimization - A comprehensive survey. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196 S. 3190–3218, 2007.
- [2] Lukas Fröhlich, Edgar Klenske, Julia Vinogradska, Christian Daniel, und Melanie

- Zeilinger. Noisy-Input Entropy Search for Efficient Robust Bayesian Optimization. In *International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, S. 2262–2272. Proceedings of Machine Learning Research, 2020.
- [3] Martin Roth, Freitag Stephan, Michael Franz, Stefan Goetz, und Sandro Wartzack. Accelerating sampling-based tolerance–cost optimization by adaptive surrogate models. *Engineering Optimization*, S. 1–23, 2024. doi: 10.1080/0305215X.2024.2306142. URL: <https://doi.org/10.1080/0305215X.2024.2306142>.
- [4] Julia Stecher, Lothar Kiltz, und Knut Graichen. Generalized Tolerance Optimization for Robust System Design by Adaptive Learning of Gaussian Processes. *IEEE Access*, 13 S. 68959–68983, 2025. doi: 10.1109/ACCESS.2025.3561222.
- [5] Julia Stecher, Nico Ruess, Lothar Kiltz, und Knut Graichen. Why engineers should care about semi-infinite programming: Nominal versus tolerance-aware geometry optimization of a proportional electromagnetic actuator. In *Submitted to 2025 10th IFAC Symposium on Mechatronic Systems and 14th FAC Symposium on Robotics*, 2025.
- [6] Markus Zimmermann und Johannes Edler von Hoessle. Computing solution spaces for robust design. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 94(3) S. 290–307, 2013. doi: <https://doi.org/10.1002/nme.4450>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nme.4450>.

Automatische Parameteridentifikation eines nichtlinearen parametervariierenden Modells für eine rotierende Kegelfördereinheit

Julia Isabel Hartmann†, Christoph Ament‡

Universität Augsburg, Fakultät für Angewandte Informatik, Lehrstuhl Regelungstechnik,
Am Technologiezentrum 8, 86159 Augsburg

†Tel: ++49 821 598 - 69294, E-Mail: julia.hartmann@uni-a.de

‡Tel: ++49 821 598 - 69290, E-Mail: christoph.ament@uni-a.de

Bei der Verpackung und Portionierung von Lebensmitteln stellen stückige Produkte eine besondere Herausforderung dar, da die Schwankungen im Stückgewicht einzelner Nahrungsmittel häufig eine Über- oder Unterfüllung der Verpackungseinheit nach sich ziehen. Um eine balancierte Portionierung nahe am Nennfüllgewicht einer Verpackungseinheit zu erreichen, werden in der Lebensmittelindustrie üblicherweise Mehrkopfwaagen eingesetzt. Mehrkopfwaagen sind industrielle Waagen, die durch mehrere vorhandene Wägezellen gleichzeitig verschiedene Teilmengen wiegen. Anschließend wird eine Auswahl dieser Teilmengen kombiniert, um die Variabilität im Stückgewicht auszunutzen und somit eine Füllmenge nahe der Nennfüllmenge zu erzielen.

Im Zuge des Wägeprozesses erfolgt die Verteilung des Produkts auf die Wägezellen über eine rotierende, kegelförmige Fördereinheit. Die Dynamik der Teilchen auf der Fördereinheit ist maßgeblich durch die Reibung und den Kontakt zwischen den Teilchen und der Fördereinheit bestimmt. In [1] wird ein nichtlinearer Modellierungsansatz vorgestellt, der den generischen und numerisch stabilen Ansatz der dynamischen Reib- und Kontaktmodellierung nach [3] und [4] um ein kinematisches Modell für den Kegelförderer erweitert. Neben den nichtlinearen Kontaktinteraktionen weist das Modell aus [1] zudem nichtlineares parametervariierendes (NLPV) Verhalten auf, da ein Teil der Modellparameter vom initialen Zustand (Startposition) und der auf das System aufgebrachten Stellgröße (Drehgeschwindigkeit) abhängt.

In der Literatur finden sich nur wenige Arbeiten wie [5, 6], welche sich mit nichtlinearen Identifikationsmethoden von NLPV-Modellen beschäftigen. Im vorliegenden Beitrag wird daher ein Verfahren zur Identifikation der variierenden Parameter des NLPV-Modells eines Kegelförderers vorgestellt. Zu diesem Zweck werden die Modellparameter zunächst in messbare und zu identifizierende Größen unterteilt. Letztere gliedern sich wiederum in konstante sowie, abhängig vom initialen Systemzustand und der aufgebrachten Stellgröße, veränderliche Parameter. Alle zu identifizierenden Parameter werden mittels einer mehrstufigen Optimierungsstrategie auf Basis des *Pattern Search*-Verfahrens ermittelt. Das Verfahren umfasst vier Stufen: eine globale Schätzung aller Koeffizienten, die getrennte Feinanpassung für niedrige und hohe Drehgeschwindigkeiten der Fördereinheit sowie ein abschließendes Feintuning im Stick-Slip-Bereich. Das Optimierungsverfahren muss für jeden Initialzustand separat durchgeführt werden. [2]

Die Methodik wird experimentell anhand eines vollfaktoriellen Versuchsdesigns an einem vom Wägesystem getrennten Demonstrator einer Kegelfördereinheit mit einem Durchmesser von 45 cm validiert. Zur Datenerfassung wird eine Tiefenkamera eingesetzt, die die Trajektorien von drei unterschiedlichen Probenkörpern mit jeweils 3 cm Durchmesser aufzeichnet. Die aufgenommenen Bilddaten werden mittels eines anwendungsspezifischen Bildverarbeitungsalgorithmus ausgewertet. Für die Parameteridentifikation werden pro

Probenkörper und Initialzustand 20 zufällig ausgewählte Messungen aus den insgesamt 600 Messungen je Probenkörper herangezogen; die verbleibenden Datensätze dienen der Modellvalidierung.

Die aus der vorgestellten mehrstufigen Identifikationsmethode resultierenden Modelle werden sowohl im Open-Loop- als auch im Closed-Loop-Betrieb simuliert. Es ergibt sich ein mittlerer *Root Mean Squared Error* (RMSE) zwischen der simulierten und gemessenen Positionen in der Ebene von 1,63–2,28 cm in der Closed-Loop-Simulation und von 0,26–0,59 cm in der Open-Loop-Simulation, jeweils bei einem Radius von 22,5 cm des Kegelförderers.

Zukünftige Arbeiten umfassen die kontinuierliche Parametermodellierung in Abhängigkeit von Initialzuständen und Stellgrößen, den Vergleich mit alternativen Verfahren zur Identifikation von NLPV-Modellen sowie den Einsatz der Modelle für eine modellbasierte Regelung der Fördereinheit und automatische Produkterkennung im Rahmen eines Multi-Model-Frameworks.

Literatur

- [1] Hartmann, J. I.; Olbrich, M.; Hamann, M.; Ament, C.: Simulation of particle motion on rotating cone feeder for a multihead weigher based on dynamic friction modeling, 2023 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2023, pp. 138–143, DOI: 10.1109/AIM46323.2023.10196110.
- [2] Hartmann, J. I.; Ament, C.: Automatic Parameter Identification of a Nonlinear Parameter-Varying Model for a Rotating Cone Feeder, 9th International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD'25), 2025, DOI: N/A.
- [3] Specker, T.; Buchholz, M.; Dietmayer, K.: A new approach of dynamic friction modelling for simulation and observation, IFAC Proceedings Volumes, vol. 47, no. 3, pp. 4523–4528, 2014, DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.01711.
- [4] Specker, T.; Buchholz, M.; Dietmayer, K.: Dynamical modeling of constraints with friction in mechanical systems, IFAC-PapersOnLine, vol. 48, no. 1, pp. 514–519, 2015, DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.05.124.
- [5] Morato, M. M.; Stojanovic, V.: A robust identification method for stochastic nonlinear parameter varying systems, Mathematical Modelling and Control, vol. 1, no. 1, pp. 35–51, 2021, DOI: 10.3934/mmc.2021004.
- [6] Deng, J.; Huang, B.: Identification of nonlinear parameter varying systems with missing output data, AIChE Journal, vol. 58, no. 11, pp. 3454–3467, 2012, DOI: 10.1002/aic.13735.

Improving parameter identification of an austenite decomposition model using sensitivity analysis and experimental design

S. Sannes†, L. Jadachowski†, M. Niederer‡, A. Steinboeck†

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

‡Center for Vision, Automation & Control, Austrian Institute of Technology (AIT), Austria

Precise temperature control is critical in steel strip processing to achieve the desired quality and material properties. Achieving smart, efficient and precise production requires the implementation of advanced process control strategies based on a reliable thermal model of the plant. In [1], a thermal model was developed coupled with a low-dimensional phase transformation model to account for the release of latent heat during phase transformations in the annealing section of a continuous steel strip processing line. This phase transformation model is a non-linear, phenomenological kinetic model describing austenite decomposition, and is well-suited for model-based control applications.

After developing a dynamical model such as the phase model, the issue of identifiability of unknown model parameters should be addressed. The central question is: Can the unknown or uncertain parameters θ of our model be uniquely identified? Given that the developed model should adequately describe the input-output behavior of the system, parameter estimation can be performed by fitting the model to observed data through solving an optimization problem. However, this process is not always straightforward. The problem might be ill conditioned such that it does not easily converge or give unreliable parameter estimations which can lead to unsatisfactory model predictions.

A way to address these issues is through a parameter identifiability analysis by estimating the sensitivity of the model output \mathbf{y} with respect to the model parameters θ [2]. This can be used to calculate the collinearity index, which is a commonly used diagnostic tool that indicates the degree of linear dependency between parameters. A high collinearity index means that an output change due to modifying one parameter can be compensated by a specific change of other parameters. In this case, the parameters are not uniquely defined and the equality $\mathbf{y}(\theta_1)=\mathbf{y}(\theta_2)$ may hold true for specific parameter values $\theta_1 \neq \theta_2$.

A high collinearity index can arise from two main causes:

1. Some model parameters are inherently non-identifiable, or
2. the data used for parameterization does not sufficiently excite the system.

Cause 1 can be addressed by identifying poorly identifiable parameters via a sensitivity analysis and subsequently fixing their values, e.g. based on data from the literature. Various approaches exist to find poorly identifiable parameters such as orthogonalization methods, the eigenvalue method, and combinatorial methods [2, 3]. **Cause 2** can be addressed by producing training data that covers the necessary excitations of the system needed to identify the model parameters. A Design of Experiment strategy can achieve this in a systematic and efficient way. By using the existing dynamic model, the excitations

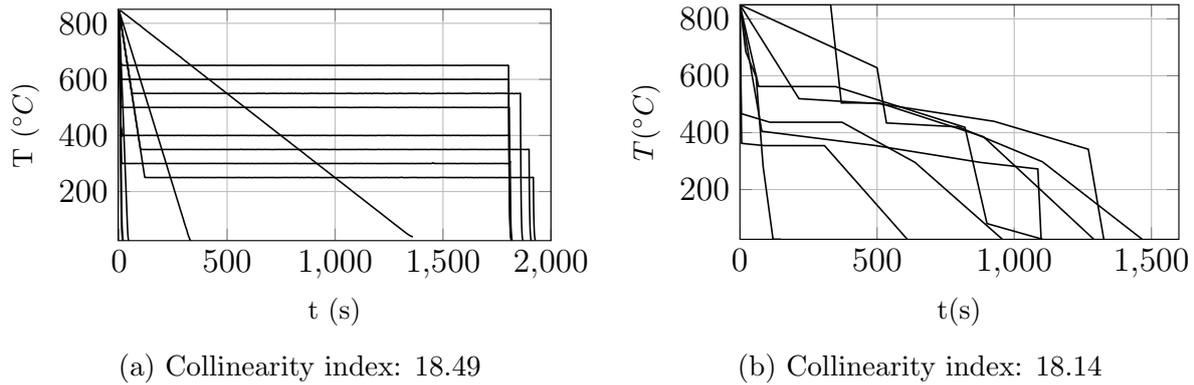


Figure 1: (a) 14 state-of-the-art, and (b) 8 optimized temperature trajectories.

of the system needed for unique and robust parameter identification can be determined [4]. The strategy allows for efficient experiment planning, because it reduces the number of required experiments and achieves better or similar estimations of the parameters.

For the considered phase transformation model, experimental measurements with temperature trajectories shown in Figure 1a are the industry standard. They include periods with constant cooling rates and temperature holds. During these experiments, the expansion (dilation) of the material is measured, which allows for back-calculation of the phase evolutions in the material, and thus parameterization of the phase transformation model. Alternatively, by using a Design of Experiment strategy, temperature trajectories can be optimized (Figure 1b) in favor of efficient and robust parameter identification. As indicated in Figure 1, this improves the collinearity index while needing fewer experiments.

In this talk, the topics sensitivity analysis and Design of Experiments will be explored to show how they can improve parameter identification. A demonstration of these concepts will be presented through their application to the phase transformation model.

References

- [1] M. Niederer; P. Zeman; S. Sannes; H. Seyrkammer; G. Helekal; A. Kugi; A. Steinboeck: A control-oriented mathematical model for the evolution of temperatures and phases in a steel strip during cooling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 225, 2024.
- [2] A.Gábor; A.F. Villaverde; J.R. Banga: Parameter identifiability analysis and visualization in large-scale kinetic models of biosystems, *BMC Systems Biology*, 2017.
- [3] S. Vadjia; H. Rabitz; E. Walter; Y. Lecourtier: Qualitative and quantitative identifiability analysis of nonlinear chemical kinetic models, *chemical engineering communications*, volume 83, p.191-219, 1989.
- [4] A.F. Emery; A.V. Nenarokomov: Optimal experiment design, *Measurement Science and Technology*, Volume 9, 1998.