Sampling-basierte modellprädiktive Regelung unter Verwendung deterministischer Samples

Markus Walker

Lehrstuhl für Intelligente
Sensor-Aktor-Systeme (ISAS)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
markus.walker@kit.edu

Uwe D. Hanebeck

Lehrstuhl für Intelligente
Sensor-Aktor-Systeme (ISAS)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
uwe.hanebeck@kit.edu

Schlüsselwörter: Modellprädiktive Regelung, Kreuzentropiemethode, Modellprädiktive Pfadintegralregelung, deterministische Samples.

Die Sampling-basierte modellprädiktive Regelung (MPC) unter Verwendung der Kreuzentropiemethode (CEM) (engl. cross entropy method) oder der modellprädiktiven Pfadintegralregelung (MPPI) (engl. model predictive path integral control) sind leistungsstarke gradientenfreie Verfahren zur Regelung nichtlinearer Systeme. Bei beiden Methoden werden zufällige Samples aus einer Vorschlagswahrscheinlichkeitsverteilung gezogen und anhand einer Kostenfunktion bewertet. Während CEM dabei eine Elite-Menge der besten Samples auswählt, berücksichtigt MPPI alle Samples mittels exponentieller Gewichtung. Basierend auf den bewerteten Samples wird die Vorschlagsverteilung iterativ angepasst, um in der nächsten Iteration Samples mit geringeren Kosten zu ziehen. Im Kontext der MPC entspricht ein Sample einem zeitlichen Verlauf der zu optimierenden Stellgrößen im Prädiktionshorizont. Die Abhängigkeit von zufälligen Samples resultiert jedoch häufig in einer ineffizienten Erkundung des Lösungsraums und in ungleichmäßigen Stellgrößenverläufen, was in realen Anwendungen zu erhöhtem Verschleiß der Aktoren führen kann.

Um diese Nachteile zu adressieren, wird in diesem Vortrag der Einsatz deterministischer Samples im Kontext der Sampling-basierten MPC vorgestellt. Die Grundidee besteht darin, die Positionen einer festgelegten Anzahl von Samples so zu optimieren (bezüglich der modifizierten Cramér-von-Mises-Distanz [1]), dass sie eine gegebene Verteilung optimal repräsentieren (siehe Abbildung 1). Mit *deterministic sampling CEM* (dsCEM) [2] wird ein Ansatz vorgestellt, der diese deterministischen Samples in die CEM integriert. Darauf aufbauend kombiniert *deterministic sampling MPPI* (dsMPPI) [3] die deterministischen Samples mit der exponentiellen Gewichtung von MPPI. Beide Methoden berücksichtigen zusätzlich zeitliche Korrelationen zwischen aufeinanderfolgenden Stellgrößen, um glatte Stellgrößenverläufe zu gewährleisten.

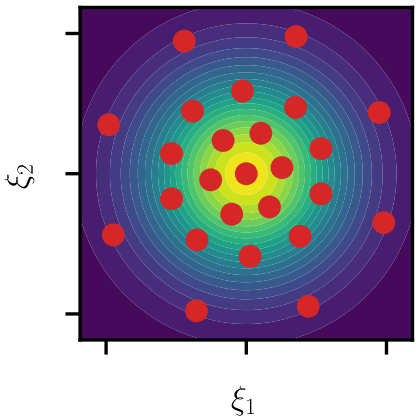


Abbildung 1: Ein Beispiel für 25 zweidimensionale deterministische Samples einer Standard-Normalverteilung, wobei die Hintergrundfarbe den Wert der Wahrscheinlichkeitsdichte andeutet.

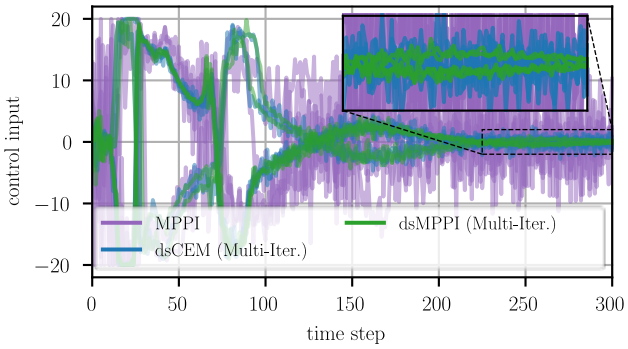


Abbildung 2: Zeitverläufe von Stellgrößen am Beispiel des geregelten inversen Pendels.

Experimentelle Evaluierungen an nichtlinearen Regelungssystemen zeigen, dass die vorgeschlagenen Ansätze den Stand der Technik in Bezug auf die Glattheit der Stellgrößenverläufe übertreffen (siehe Abbildung 2). Insbesondere bei geringer Sample-Anzahl werden deutlich glattere Trajektorien erzielt als mit zufallsbasierten Verfahren.

Literatur

[1] Uwe D. Hanebeck, Marco F. Huber und Vesa Klumpp. „Dirac Mixture Approximation of Multivariate Gaussian Densities “. In: Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Decision and Control. 2009.

[2] Markus Walker, Daniel Frisch und Uwe D. Hanebeck. „Sample-Efficient and Smooth Cross-Entropy Method Model Predictive Control Using Deterministic Samples“. arXiv preprint: 2510.05706. 2025.

[3] Markus Walker et al. „Smooth Sampling-Based Model Predictive Control Using Deterministic Samples“. 2025.

Decision-Making für multikriterielle modellprädiktive Regelung

Markus Herrmann-Wicklmayr
Systems Modeling and Simulation
Universität des Saarlandes
markus.herrmannwicklmayr@uni-saarland.de

Kathrin Flaßkamp
Systems Modeling and Simulation
Universität des Saarlandes
kathrin.flasskamp@uni-saarland.de

Schlüsselwörter: MPC, multikriterielle Optimierung, nichtlineare Optimierung

Wir betrachten die Problemstellung einer modellprädiktiven Regelung zur Fixpunkt-Stabilisierung unter mehreren Optimierungskriterien. Hier bedarf es eines automatisierbaren Entscheidungsmechanismus, der a-priori gewählte Präferenzen zwischen den Optimierungskriterien während des Betriebs in realisierbare Lösungen überführt. Für diesen Schritt der Entscheidungsfindung (*decision-making*) führen wir einen Ansatz ein, der die Informationen aus den individuellen Minima der einzelnen Zielfunktionen nutzt. Unabhängig von der Anzahl der Zielfunktionen genügen zwei sequenzielle Chargen an Optimierungen, um die Entscheidungsfindung umzusetzen. Dies ist vorteilhaft für die Echtzeitfähigkeit einer multikriteriellen modellprädiktiven Regelung (*multi-objective model predictive control*, MOMPC).

Die vorgeschlagene Methodenklasse operiert auf den Pareto-Fronten und verwendet insbesondere die individuellen Minima, welche charakteristische Punkte der Pareto-Fronten sind. Ziel der automatisierten Entscheidungsfindung ist es, zuvor getroffene Präferenzen robust auf Punkte der zeitlich veränderlichen Pareto-Front abzubilden. Hinzu kommt die Herausforderung, Stabilität im geschlossenen Regelkreis zu gewährleisten. Beides wird im vorgestellten MOMPC-Ansatz adressiert.

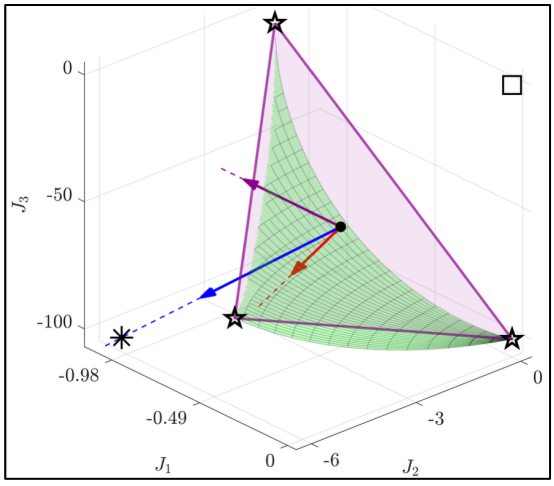


Abbildung 1: Beispiel eines multikriteriellen Optimierungsproblems mit drei Zielen J_1, J_2, J_3 und Pareto-Front in grün. Die individuellen Minima (Sterne) spannen ein Simplex auf (lila dargestellt) und definieren den Utopia-Punkt (Asterisk), sowie den Nadir-Punkt (Quadrat). Dargestellt sich auch verschiedene Konzepte von Normalenrichtungen (Pfeile). Präferenzen zwischen den Zielfunktionen können bspw. durch Punkte auf dem Simplex abgebildet und mit Hilfe der Normalenrichtungen auf die Pareto-Front projiziert werden. Dies konstruiert verschiedene Entscheidungsfindungprozesse, die automatisiert in die modellprädiktive Regelung integriert werden können.

Es werden verschiedene Varianten von Entscheidungsfindungsmethoden auf Basis der individuellen Minima (vgl. Abbildung 1), die teilweise aus der Literatur bekannt und andernfalls selbst entwickelt wurden, vorgeschlagen und systematisch analysiert. Weitergehend werden diese Methoden in das MOMPC-Framework mit quasi-unendlichem Horizont eingebettet, sodass ein formaler Nachweis für asymptotische Stabilität im geschlossenen Regelkreis geliefert werden kann. Dieser gilt für alle vorgestellten Entscheidungsfindungsmethoden. Die Abstiegsbedingung ist hierbei weniger restriktiv als bestehende Ansätze in der Literatur. In simulativen Beispielen demonstrieren wir Anwendbarkeit und Performanz der vorgeschlagenen Methode.

Literatur

[1] H. Chen und F. Allgöwer, „A Quasi-Infinite Horizon Nonlinear Model Predictive Control Scheme with Guaranteed Stability“, *Automatica*, Bd. 34, Nr. 10, S. 1205–1217, Okt. 1998, doi: 10.1016/S0005-1098(98)00073-9.

[2] H. Karcher, „Riemannian center of mass and mollifier smoothing“, *Communications on Pure and Applied Mathematics*, Bd. 30, Nr. 5, S. 509–541, 1977, doi: 10.1002/cpa.3160300502.

[3] G. Eichfelder, *Adaptive Scalarization Methods in Multiobjective Optimization*. in Vector Optimization. Berlin Heidelberg: Springer Berlin, 2008. [Online]. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-540-79159-1

[4] S. Peitz und M. Dellnitz, „A Survey of Recent Trends in Multiobjective Optimal Control—Surrogate Models, Feedback Control and Objective Reduction“, *MCA*, Bd. 23, Nr. 2, S. 30, Juni 2018, doi: 10.3390/mca23020030.

[5] I. Das und J. E. Dennis, „Normal-Boundary Intersection: A New Method for Generating the Pareto Surface in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems“, *SIAM J. Optim.*, Bd. 8, Nr. 3, S. 631–657, Aug. 1998, doi: 10.1137/S1052623496307510.

[6] I. Das, „On characterizing the “knee” of the Pareto curve based on Normal-Boundary Intersection“, *Structural Optimization*, Bd. 18, Nr. 2, S. 107–115, Okt. 1999, doi: 10.1007/BF01195985.

[7] L. Grüne und M. Stieler, „Multiobjective model predictive control for stabilizing cost criteria“, *Discrete & Continuous Dynamical Systems - B*, Bd. 24, Nr. 8, S. 3905–3928, 2019, doi: 10.3934/dcdsb.2018336.

[8] M. Herrmann-Wicklmayr und K. Flaßkamp, „Accelerating Multi-objective Model Predictive Control Using High-Order Sensitivity Information“, in *Systems Theory in Data and Optimization*, J. Berberich, A. Iannelli, und F. Allgöwer, Hrsg., Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, S. 215–230. [Online]. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-031-83191-1_14

Verschlüsselte Optimierung mit Ungleichheitsbedingungen: Auf dem Weg zu verschlüsselter MPC Regelung

Sebastian Schlor
Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik
Universität Stuttgart
sebastian.schlor@ist.uni-stuttgart.de.de

Frank Allgöwer
Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik
Universität Stuttgart
frank.allgower@ist.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: Verschlüsselte Optimierung, verschlüsselte Regelung, Optimierungsverfahren, homomorphe Verschlüsselung

Seit ihrem Aufkommen vor zehn Jahren [1] hat sich die verschlüsselte Regelung als verlässliche Methode etabliert, um Datensicherheit in Regelkreisen mit sensiblen Informationen oder besonders schutzbedürftigen Systemen zu gewährleisten. Herzstück dieser Entwicklung sind homomorphe Verschlüsselungsverfahren (engl. *homomorphic encryption*, HE). Sie ermöglichen etwas eigentlich Unvorstellbares: Additionen und Multiplikationen direkt mit verschlüsselten Werten auszuführen. Erst wenn ein vertrauenswürdiges Gerät mit dem geheimen Schlüssel das Ergebnis entschlüsselt, wird der berechnete Wert sichtbar. Auf dieser Grundlage wurden bereits zahlreiche klassische Regelungsansätze präsentiert, bei denen sowohl Messdaten als auch Reglerparameter und Stellsignale vollständig verschlüsselt bleiben [2].

Für komplexere Regelalgorithmen, insbesondere Modellprädiktive Regelung (engl. *model predictive control*, MPC), werden allerdings Rechenoperationen benötigt, die über Additionen und Multiplikationen hinausgehen. Im Speziellen wird hierbei in jedem Zeitschritt die Lösung eines Optimalsteuerungsproblems benötigt, häufig zusätzlich unter strikten Nebenbedingungen für Zustände und Stellgrößen. Herkömmliche Verfahren zur Lösung solcher Probleme setzen jedoch Operationen wie Fallunterscheidungen, Divisionen oder Projektionen voraus – also genau jene nichtpolynomiellen Rechenschritte, die HE nicht unterstützt. Bisherige Ansätze für verschlüsselte MPC nutzen deshalb explizite, offline berechnete Lösungen sowie Verfahren, die sich mit nur einem einzigen Gradientenschritt der Lösung annähern, und lagern die kritischen Operationen auf Sensor oder Aktuator aus.

In diesem Vortrag wird ein neuartiges Verfahren zur verschlüsselten Lösung eines durch quadratische Ungleichheitsbedingungen beschränkten konvexen, quadratischen Optimierungsproblems vorgestellt [3]. Nach dem Vorbild Innerer Punkte Verfahren mit logarithmischen Barriere- oder stückweise definierten Penaltyfunktionen wird eine polynomielle Penaltyfunktion konstruiert, deren Grad variiert werden kann. Damit wird das beschränkte Optimierungsproblem durch eine Sequenz unbeschränkter Optimierungsprobleme ersetzt, wobei die Summe aus ursprünglicher Kostenfunktion und der Penaltyfunktion als neue, variierende Kostenfunktion dient. Auf dieser Sequenz von Kostenfunktionen mit steigendem Polynomgrad wird ein

sequenzielles Gradientenverfahren angewandt, d.h. für jede Kostenfunktion wird ein Gradientenschritt durchgeführt und anschließend der Polynomgrad erhöht. Es ergibt sich eine Folge von Iterationspunkten, welche sich der gesuchten Lösung annähert.

Es wird gezeigt, dass sich die Iterationspunkte in jedem Schritt innerhalb des erlaubten Bereichs befinden, die Optimierung also jederzeit mit einer zulässigen Näherung abgebrochen werden kann. Außerdem wird gezeigt, dass die Iteration für eine steigende Anzahl an Iterationsschritten zum gewünschten Minimum konvergiert.

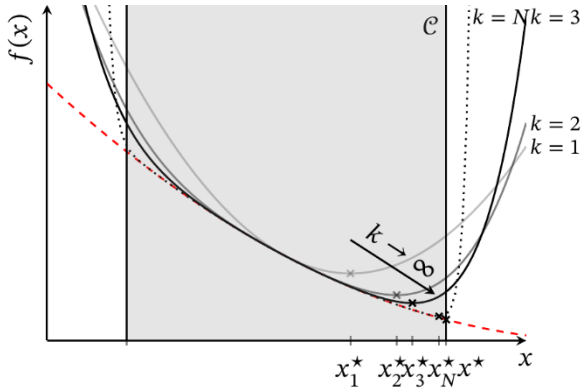


Abbildung 1: Illustration einer zu minimierenden Kostenfunktion (rot, gestrichelt) im erlaubten Bereich (graues Intervall). Mit steigendem Parameter k kann mit der Sequenz von unbeschränkten Optimierungsproblemen die Ursprüngliche Lösung angenähert werden.

Mit diesem Verfahren als Grundlage können weitere Lösungsalgorithmen für verschlüsselte, beschränkte Optimierungsprobleme entwickelt werden, um Probleme, wie sie bei MPC auftreten, zu lösen. Zur Anwendung gehört nicht nur die bereits erwähnte Modellprädiktive Regelung sondern auch weitere Optimierungsprobleme außerhalb der Regelung. So ermöglichen verschlüsselte Berechnungen zum Beispiel die Verarbeitung personenbezogener Patientendaten mehrerer Kliniken zur Entwicklung von Krebsmodellen [4]. Die Einbeziehung von Beschränkungen und Nebenbedingungen erweitert die anwendbaren Modelle erheblich.

Literatur

[1] K. Kogiso und T. Fujita. „Cyber-security enhancement of networked control systems using homomorphic encryption“. In: *Proc. of the 54th Conference on Decision and Control (CDC)*, S.6836–6843. 2015.

[2] N. Schlüter, P. Binfet und M. Schulze Darup. „A brief survey on encrypted control: From the first to the second generation and beyond“. In: *Annual Reviews in Control*, Vol. 56, S. 100913. 2023.

[3] S. Schlor, A. Iannelli, J. Kim, H. Shim und F. Allgöwer. „A polynomial-based QCQP solver for encrypted optimization“. In: *Proc. of the 64th Conference on Decision and Control (CDC)*, to appear. Preprint: arXiv:2510.17294. 2025.

[4] E. Sarkar, E. Chielle, G. Gursoy, L. Chen, M. Gerstein und M. Maniatakos. „Privacy-preserving cancer type prediction with homomorphic encryption“. In: *Scientific reports*. 13. Jg., Nr. 1, S. 1661. 2023.

Modellierung und Verifikation von industriellen verteilten Steuerungssystemen

Friederike Bruns

Verteilte Regelung in vernetzten Systemen
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
friederike.bruns@uol.de

Andreas Rauh

Verteilte Regelung in vernetzten Systemen
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
andreas.rauh@uol.de

Schlüsselwörter: Echtzeitkommunikation, Echtzeitsysteme, Set-Based Temporal Logic

Die Verifikation von industriellen verteilten Steuerungssystemen stellt eine Herausforderung dar, denn das Systemverhalten ergibt sich aus der Kombination vieler autonomer logischer und physikalischer Komponenten, die parallel arbeiten und miteinander interagieren. Dadurch entsteht ein großer Zustandsraum, in dem Ereignisreihenfolgen, Verzögerungen und Ausfälle und, damit verbunden, deren Auswirkungen nicht eindeutig vorhersehbar sind. Zusätzlich erschweren oft heterogene Ausführungsplattformen und eine fehlende globale Zeitbasis die Modellierung des realen Systemverhaltens. Bestehende Verifikationsansätze skalieren daher nur begrenzt oder erfordern eine starke Abstraktion, beispielsweise des Kommunikationsverhaltens, wodurch eine Lücke zwischen verifiziertem Modell und tatsächlicher Implementierung entsteht. Dies kann durch unnötig konservative Auslegungen zu Leistungseinbußen, aber auch durch die Vernachlässigung von Effekten zu Sicherheitsrisiken führen. Für die Entwicklung komplexer vernetzter Cyber-Physischer Systeme (CPS) hat die sogenannte kontraktbasierte Entwurfsmethodik (Contract-Based Design, CBD) in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass das gewünschte Verhalten des Gesamtsystems durch eine geeignete Verknüpfung von Teilkontrakten für einzelne Systemkomponenten sichergestellt werden kann.

Der in [1] vorgestellte Ansatz führt im ersten Schritt eine formale Definition logischer Nachrichten (message) ein, welche physikalischen Kanälen (channel) zugeordnet werden können. Durch die Ergänzung der Modellierungselemente auf Softwareapplikationsebene um Zeiteigenschaften, kann nicht nur die Erstellung deterministischer Applikationen unterstützt werden. Es wird zudem auch eine systematische Methodik für die Zuordnung von Softwarekomponenten auf Hardwareressourcen ermöglicht. Die systematische Methodik beinhaltet ein iteratives Verfeinern der Applikation und das Sicherstellen der zeitlichen Kompatibilität der modellierten Funktions- und Kommunikationskomponenten. Durch die Verbindung einer gesichert deterministischen Modellierung und das Verwenden zeitgesteuerter Kommunikationsprotokolle kann eine präzise Zeitsynchronisation der beteiligten Endpunkte und ein vorhersehbares Zeitverhalten der gesamten verteilten Applikation ermöglicht werden.

Industrielle verteilte Systeme zeichnen sich durch das Zusammenspiel zahlreicher Hardware- und Softwarekomponenten aus, die nicht nur zeitlich koordiniert werden müssen, sondern bei denen insbesondere auch das funktionale Verhalten abgesichert sein muss. Moderne CPS müssen zuverlässig in unsicheren Umgebungen funktionieren, die durch Rauschen, externe Störungen und dynamische Bedingungen gekennzeichnet sind. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, sind Methoden erforderlich, die sowohl interne Systemkomplexitäten als

auch externe Unsicherheiten erfassen können. Neben der Spezifikation des nominalen Zeitverhaltens von Systemen können Kontrakte auch zur Erkennung von fehlerhaftem Systemverhalten verwendet werden, wenn sie in Monitoringkomponenten eingebettet sind. Hierbei wird es möglich, Unsicherheiten über die Entwurfsmethodik hinaus zur Laufzeit zu berücksichtigen, wenn mengenbasierte und/oder stochastische Erweiterungen in das CBD aufgenommen werden. Existierende temporale Logiken zum Ausdrücken von Annahme-Garantie-Kontrakten beinhalten jedoch nur begrenzt die Möglichkeit, Unsicherheiten effektiv zu behandeln. Insbesondere stellt [2] die Set-Based Temporal Logic (SBTL) zum Ausdrücken von Annahme-Garantie-Kontrakten vor, indem sie traditionelle Kontraktspezifikationen um eine mengenbasierte Erreichbarkeitsanalyse erweitert, die die Darstellung von Unsicherheiten ermöglicht und implizite Systemverhalten berücksichtigt. Durch die Integration von mengenbasierten Ausdrücken mit zeitlichen Beschränkungen bietet SBTL einen robusteren Spezifikationsformalismus. In [3] schlagen wir ein neuartiges, dezentrales, systematisches, mengenbasiertes Ableitungsverfahren für SBTL-Kontrakte vor, das insbesondere dann anwendbar ist, wenn die Stabilität des vernetzten Systems mit Hilfe der Systemeigenschaft der Passivität oder des Small-Gain-Theorems überprüft werden kann. In [4] nutzen wir die vorgestellten Ansätze für die Optimierung von Reglern, indem zunächst eine Erreichbarkeitsanalyse für dynamische Systemmodelle durchgeführt wird und dann eine Kontraktverschärfung für die unsicheren aber beschränkten Parameterintervalle durchgeführt wird. Dies ermöglicht unter anderem die Auswahl optimaler konstanter Reglerparameter oder die Bestimmung optimaler Schaltsequenzen zwischen mehreren Regelgesetzen. Analog können auch Rekonfigurationen von Streckenkomponenten vorgenommen werden, zum Beispiel mit dem Ziel, die Zulässigkeit von Rekonfigurationsstrategien im Falle von Fehlerszenarien, die auf beschränkte Parameteränderungen zurückgeführt werden können, zu validieren.

Literatur

[1] Friederike Bruns, Jörg Walter und Andreas Rauh. *Contract-Based Design for Robust Networked Control Systems in Industrial Automation*. In ISA Transactions The Journal of Automation 167, (2025), 17 pages. doi: https://doi.org/10.1016/j.isatra.2025.09.011.

[2] Friederike Bruns, Andreas Rauh und Mohamed Fnadi. *Set-Based Assumption-Guarantee Reasoning for Handling Uncertainty in Functionality and Safety Verification of Dynamic Systems*. In Design and Verification of Cyber-Physical Systems: From Theory to Applications, Editors: Andreas Rauh, Bernd Finkbeiner, and Paul Kröger, A Springer Nature Computer Science book series, 2025. (zur Publikation angenommen)

[3] Andreas Rauh und Friederike Bruns. *A Set-Based Approach to Derive Contracts for Dynamic Behavior in Interconnected Systems*. In 29th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje, Polen, 2025.

[4] Andreas Rauh und Friederike Bruns. *Set-Based Contracts for Systematic Controller Tuning in Interconnected Dynamic Systems.* In at-Automatisierungstechnik, 2026. (zur Publikation angenommen)

Effizienter Entwurf von vernetzten Regelkreisen

Katarina Stanojević, Martin Steinberger und Martin Horn

Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik

Technische Universität Graz
katarina.stanojevic@tugraz.at

Schlüsselwörter: Vernetzte Regelkreise, Beobachterbasierter Reglerentwurf, Zeitvariable Verzögerungen, Paketverluste, Lyapunov-Funktionen

Vernetzte Regelkreise sind über Kommunikationsnetzwerke geschlossene Regelkreise, wodurch die Verkabelungskomplexität sowie der Installations- und Wartungsaufwand reduziert werden und gleichzeitig eine flexible sowie skalierbare Systemstruktur ermöglicht wird. Der netzwerkbasierte Betrieb bringt jedoch Herausforderungen mit sich, insbesondere in Form von variablen Totzeiten und Datenverlusten, die die Systemperformance und Stabilität maßgeblich beeinflussen können. In diesem Beitrag werden robuste und zugleich recheneffiziente Entwurfsverfahren für die Regelung und Zustandsschätzung unter verzögerter und unzuverlässiger Kommunikation vorgestellt.

Die inhärente Komplexität zeitvariabler Modelle vernetzter Regelkreise, die aus unvorhersehbaren Netzwerkeinflüssen resultiert, stellt eine wesentliche Herausforderung für die Stabilitätsanalyse und den Reglerentwurf dar. Zur strukturierten Abbildung dieser Effekte wird ein Puffer eingeführt, der eine gemeinsame Darstellung der Regelstrecke sowie des Netzwerks als schaltendes System ermöglicht, dessen Betriebsmodi unterschiedliche Verzögerungs- und Verlustsituationen repräsentieren. Auf dieser Grundlage wird eine Lyapunov-basierte Reglersynthesemethode entwickelt [1], die robuste Stabilität für alle zulässigen Betriebsmodi gewährleistet. Die resultierenden Entwurfsbedingungen lassen sich als System linearer Matrixungleichungen formulieren, die zu einer recheneffizienten Lösung führen.

Weiterhin wird ein Beobachter-Framework vorgestellt, das die schaltende Systemdarstellung auch für vernetzte Regelkreise mit Zustandsschätzung beibehält. Dadurch kann ein schaltender Beobachter formuliert werden [2], der die Verfügbarkeit eingehender Sensordaten überwacht und seine Dynamik entsprechend anpasst, sodass die Zustandsschätzung auch bei verzögerten und fehlenden Daten konvergiert. Der Ansatz reduziert Verzögerungen um eine Abtastperiode und kompensiert Datenverluste zwischen Sensor und Beobachter, wodurch eine kontinuierliche Zustandsschätzung ermöglicht wird, während das Separationstheorem erhalten bleibt.

Literatur

[1] K. Stanojevic, M. Steinberger, and M. Horn, Switched Lyapunov Function-Based Controller Synthesis for Networked Control Systems: A Computationally Inexpensive Approach, IEEE Control Systems Letters, vol. 7, pp.2023-2028, 2023

[2] K. Stanojevic, M. Steinberger, and M. Horn, Robust State Estimation in Networked Control Systems under Data Loss and Delays: A Switched Lyapunov Function based Approach, 2025 European Control Conference (ECC), Thessaloniki, Greece, 2025

Dynamic Input Transfer for Multi-Agent ILC

Dustin Lehmann
Fachgebiet Regelungssysteme
Technische Universität Berlin
dustin.lehmann@tu-berlin.de

Jörg Raisch
Fachgebiet Regelungssysteme
Technische Universität Berlin
raisch@control.tu-berlin.de

Schlüsselwörter: learning control, transfer learning, multi-agent systems, output tracking

Learning-based control methods such as Iterative Learning Control (ILC) and Reinforcement Learning (RL) enable high-precision output tracking by iteratively learning feedforward input trajectories tailored to a given dynamical system. While highly effective, these methods typically produce system-specific inputs that cannot be directly reused on systems with different dynamics. Even small discrepancies in the dynamics can cause significant performance degradation when learned inputs are applied to a new system.

Relearning the same task independently on each agent of a multi-agent system is often inefficient, costly, or unsafe. In many practical settings—particularly for underactuated or safety-critical systems—intermediate inputs encountered during learning may violate state or output constraints, leading to failure. These considerations motivate the need for systematic methods that enable the reuse of learned experience across heterogeneous dynamical systems.

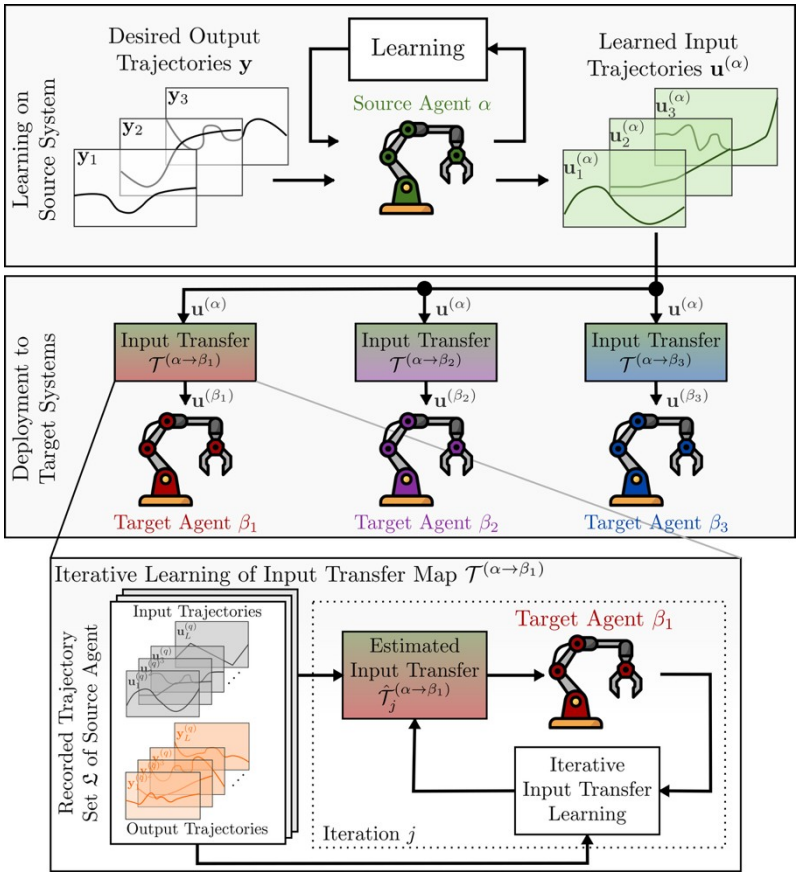


Figure 1: Schematic overview of the proposed iterative input transfer learning algorithm that enables the reuse of input trajectories across a multi-agent system

This talk addresses the problem of input transfer between agents with different dynamics. Rather than transferring task-specific inputs directly, we propose to learn a *dynamic input transfer map* that transforms input trajectories from a source agent into inputs that produce similar output trajectories on a target agent. Once learned, this map enables direct deployment of multiple transferred inputs or provides a safe and informative prior for rapid adaptation using ILC or RL, thus avoiding relearning every task on a new target system.

The proposed approach is control-theoretic and exploits the structure and convergence properties of Iterative Learning Control. Input transfer is formulated as a trial-domain learning problem in which the transfer map is iteratively refined based on measured input–output data. We present both a model-based variant, for which monotonic convergence guarantees are established using lifted-system representations for linear systems, and a fully data-driven, model-free algorithm that requires no a-priori knowledge of either source or target dynamics. Despite this minimal information structure, we also prove convergence of the model-free algorithm for linear systems after a finite number of trials.

To demonstrate real-world performance and applicability beyond the class of dynamics for which convergence has been proven mathematically, the approach is validated experimentally on a group of heterogeneous balancing inverted pendulum robots with nonlinear, non-minimum-phase dynamics. We demonstrate that inputs learned on one robot can be reliably transferred to others, enabling accurate execution of challenging motion tasks that would be unsafe to learn from scratch. Comparative results highlight clear benefits over direct transfer and existing alignment-based methods.

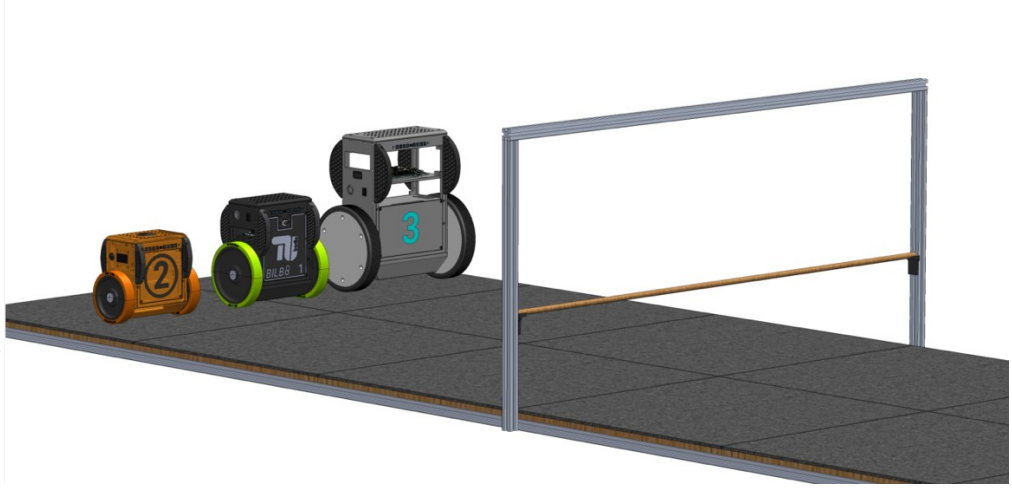


Figure 1: Exemplary robotic learning problem used for evaluation: a group of balancing inverted pendulum robots learns a common task involving a complex motion to traverse beneath a limbo bar. The motion is learned by one robot using ILC and then transferred to the other robots.

Bibliography

[1] D. Lehmann, P. Drebinger, T. Seel and J. Raisch, "Data-Driven Dynamic Input Transfer for Learning Control in Multi-Agent Systems with Heterogeneous Unknown Dynamics," *2023 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Singapore, Singapore, 2023, pp. 2358-2365, doi: 10.1109/CDC49753.2023.10383433.

[2] M. Meindl, F. Molinari, D. Lehmann and T. Seel, "Collective Iterative Learning Control: Exploiting Diversity in Multi-Agent Systems for Reference Tracking Tasks," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 30, no. 4, pp. 1390-1402, July 2022, doi: 10.1109/TCST.2021.3109646.

Näherungsweiser Folgereglerentwurf durch Reihenentwicklung

Daniel Gerbet

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

Klaus Röbenack

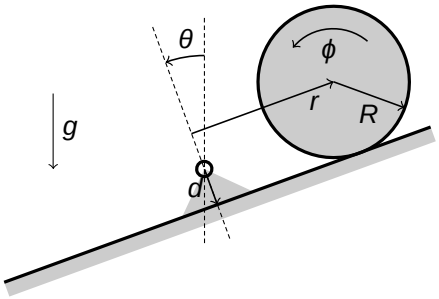
Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie
TU Dresden
klaus.roebenack@tu-dresden.de

Schlüsselwörter: Folgeregler, Reihenentwicklung

Das Problem des Folgereglerentwurfs besteht darin, eine Rückführung des Zustandes auf den Systemeingang derart zu konstruieren, dass die Abweichung zu einer beliebig vorgebbaren Referenztrajektorie asymptotisch abnimmt. Falls es das System erlaubt, kann eine Eingangs-Ausgangs-Linearisierung durch eine geeignete Zustandstransformation vorgenommen werden. Dies reduziert das Problem auf einen linearen Reglerentwurf. Allerdings muss hierfür ein Ausgang mit wohldefiniertem relativen Grad existieren, was nicht für alle System gegeben ist.

Falls eine exakte Linearisierung der Systemdynamik nicht möglich ist, kann eine näherungsweise Linearisierung vorgenommen werden [1-3]. Dieses Verfahren eliminiert schrittweise Terme von höherem Grad als dem linearen Teil aus dem Vektorfeld, lässt sich im Allgemeinen jedoch nicht beliebig fortsetzen.

In diesem Vortrag wird ein anderer Ansatz diskutiert, bei dem statt der Systemdynamik die Fehlerdynamik schrittweise linearisiert wird. Voraussetzung ist die Steuerbarkeit des um eine Gleichgewichtslage linearisierten Systems und damit die Existenz eines linearen Folgereglers. Der nichtlineare Teil der Systemdynamik wird in eine Potenzreihe entwickelt. In jedem Schritt werden Terme von immer höherem Grade in der resultierenden Fehlerdynamik eliminiert, jedoch auch immer höhere Ableitungen der Referenztrajektorie benötigt.



Ein bekanntes Beispiel eines solchen nicht Eingangs-Ausgangs-linearisierbaren Systems ist ein rollender Zylinder auf einer Wippe, deren Neigung gestellt werden kann [4]. Die Linearisierung ist überall steuerbar. Als Ausgang und Referenzgröße wird der flache Ausgang des linearsierten Systems herangezogen. In Simulationsstudien mit periodischer Erregung zeigt sich, dass der verbleibende Folgefehler mit steigendem Polynomgrad des Reglers immer weiter abnimmt.

Literatur

[1] A. J. Krener. „Nonlinear controll design via approximate normal forms“. In: *Signal Processing, Part 2: Control theory and its applications*. S. 139-154. 1990.

[2] A. Krener und M. Hubbard und S. Karaham und A. Phelps und B. Maag. „Poincaré's linearization method applied to the design of nonlinear compensators“. In: *Algebraic computing in control*. Vol. 165. S. 76-114. 1991.

[3] W. Kang. „Approximate linearization of nonlinear control systems“. In: *Systems & Control Letters*. Vol. 23. S. 43-52. 1994.

[4] J. Hauser and S. Sastry and P. Kokotovic. „Nonlinear Control Via Approximate Input-Output-Linearization: The Ball and Beam Example“. In: *IEEE Trans. on Automatic Control*. Vol. 37(3). S. 392-398. 1992.

Verteiltparametrische Regelung des Vertical-Gradient-Freeze-Kristallzüchtungsprozesses

Stefan Ecklebe
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik
UMIT TIROL
stefan.ecklebe@umit-tirol.at

Frank Woittennek
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik
UMIT TIROL
frank.woittennek@umit-tirol.at

Jan Winkler
Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie
Technische Universität Dresden
jan.winkler@tu-dresden.de

Schlüsselwörter: Verteiltparametrische Systeme, parabolische Differentialgleichungen, Flachheit, PDE Backstepping, Kristallzüchtung

Verbindungshalbleiter wie Galliumarsenid (GaAs) oder Indiumphosphid (InP) sind wichtige Werkstoffe in der Hochfrequenztechnik oder in elektrooptischen Anwendungen und dringen aufgrund ihrer Eigenschaften immer weiter in andere Bereiche vor. Die Herstellungsverfahren, um diese Materialien in monokristalliner Form und hoher Reinheit zu produzieren, sind allerdings weiterhin problembehaftet. Ein weit verbreiteter Prozess zur Herstellung dieser Materialien ist das sogenannte Vertical-Gradient-Freeze-(VGF)-Verfahren, dessen Anlagenaufbau schematisch in Abbildung 1 dargestellt ist.

Beim VGF-Verfahren handelt es sich um ein Normalerstarrungsverfahren [1]. Bei diesem wird das polykristalline Ausgangsmaterial in einem senkrecht stehenden Tiegel zunächst aufgeschmolzen, wobei lediglich der sogenannte Keim am tiefsten Punkt des Tiegels zum Teil in fester Form erhalten bleibt. Anschließend wird durch externe Heizer ein vertikaler Temperaturgradient aufgeprägt, welcher so bemessen ist, dass die Schmelzpunktisotherme von unten nach oben durch die Anlage wandert, um den Kristall so kontrolliert wachsen zu lassen. Da für ein zufriedenstellendes Ergebnis folglich das Temperaturfeld in der gesamten Anlage geregelt werden muss, fällt es in die Klasse von Systemen mit örtlich verteilten Parametern. Erschwerend kommt bei der Regelung des VGF-Verfahrens hinzu, dass an der wandernden Phasengrenze kontinuierlich Erstarrungswärme freigesetzt wird, welche abhängig von der Wachstumsgeschwindigkeit ist.

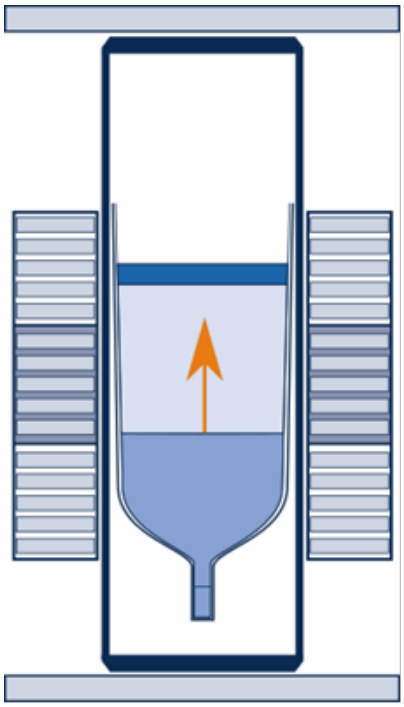


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer VGF-Anlage

Im Detail führt die Modellierung des Prozesses auf zwei eindimensionale partielle Differentialgleichungen für die Temperaturverteilungen (Wärmeleitung) in Kristall und Schmelze, welche über eine gewöhnliche Differentialgleichung für die Position der Phasengrenze miteinander verkoppelt sind [2]. Der Entwurf wird dabei durch den Umstand verkompliziert, dass sich die Definitionsbereiche der Wärmeleitungsprobleme mit der Zeit ändern, da während des Züchtungsvorgangs der Kristall wächst und die Schmelze schrumpft.

Der regelungstechnische Grundstein zur Betrachtung solcher Systeme wurde in [3] gelegt, dessen Ansätze später in der Arbeit [4] weiterverfolgt wurden. Der Vortrag diskutiert in

Anlehnung an [5] verschiedene modellbasierte Folgeregelungsansätze für den VGF-Prozess. Dazu zählen ein flachheitsbasierter und ein modellprädiktiver Entwurf aus der Gruppe der Verfahren mit früher Approximation, sowie eine kollokierte Randwertrückführung und ein backsteppingbasierter Regler als Vertreter von Verfahren mit später Approximation. Anhand von Simulationsstudien werden abschließend die vorgestellten Entwürfe miteinander verglichen und ihre Eignung für verschiedene Anwendungsfälle diskutiert.

Literatur

[1] M. Jurisch, S. Eichler und M. Bruder. „9 - Vertical Bridgman Growth of Binary Compound Semiconductors“. In: Handbook of Crystal Growth. Hrsg. von P. Rudolph. 2. Aufl. Boston: Elsevier, 2015, S. 331–372. doi: 10.1016/B978-0-444-63303-3.00009-2.

[2] J. Crank. Free and Moving Boundary Problems (Oxford Science Publications). Reprint. Oxford Science Publications. Oxford, New York: Clarendon Press, Oxford University Press, 1987. 425 S. isbn: 9780198533573.

[3] J. Rudolph, J. Winkler und F. Woittennek. Flatness based control of distributed parameter systems: Examples and computer exercises from various technological domains. Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik. Aachen: Shaker Verlag, 2003, S. 122. isbn: 978-3-8322-1195-0.

[4] S. Ecklebe. „Beiträge zur Regelung des Vertical-Gradient-Freeze-Kristallzüchtungsprozesses auf Basis verteiltparametrischer Modelle” Dissertationsschrift, Technische Universität Dresden, 2024.

[5] S. Ecklebe, N. Gehring, F. Woittennek und J. Winkler. „Beiträge zur Regelung des VGF-Kristallzüchtungsprozesses“. In: at - Automatisierungstechnik 71.3 (2023), S. 232–243. doi: 10.1515/auto-2023-0005.

Regelung von Partikeleigenschaften in der Wirbelschichtsprühagglomeration

Eric Otto

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik/Modellbildung
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
eric.otto@ovgu.de

Achim Kienle

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik/Modellbildung
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
achim.kienle@ovgu.de

Schlüsselwörter: Partikelprozesse, Partielle Differentialgleichungen, Lyapunov-basierte Regelung, Modelprädiktive Regelung

Die Wirbelschichtsprühagglomeration ist ein Prozess der mechanischen Verfahrenstechnik zur Herstellung von Partikeln mit gewünschten Eigenschaften. Dabei werden Primärpartikel in einem fluidisierten Bett unter Hinzufügung eines Bindemittels zu Agglomeraten geformt. Typische Produkte aus der industriellen Produktion sind Lebensmittelpulver, Dünger sowie pharmazeutische Produkte. Neben der Partikelgröße sind die morphologischen Eigenschaften der Agglomerate, wie z.B. die Porosität von großen Interessen, da sie Endprodukteigenschaften wie Löslichkeit, Dosierbarkeit oder Fließfähigkeit direkt beeinflussen.

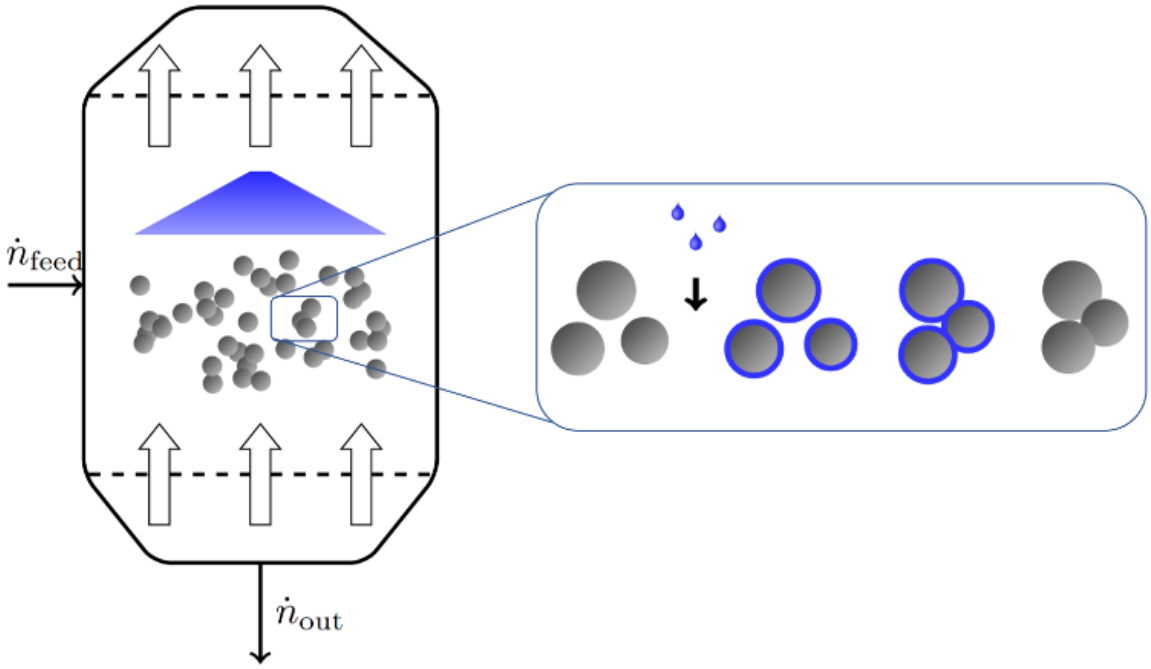


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Wirbelschichtsprühanlage mit dem Agglomerationsprozess.

Die Regelung des Prozesses hat ein großes Verbesserungspotential, da, einerseits, die Formulierung von Agglomeraten mit präzise bestimmten Eigenschaften den ökonomischen Wert erhöht, andererseits der Herstellungsprozess mit vielen Störungen und Unsicherheiten verbunden ist. Eine Haupterausforderung für modelbasierte Regelung, ist die verteilt-paramet-

rische Natur der Partikeleigenschaften. In [1] und [4] wurden Populationsbilanzmodelle basierend auf Integro-Differentialgleichungen entwickelt und an experimentellen Daten parametrisiert und validiert. Dabei wurde in [1] zunächst nur die Partikelgröße und in [3] zusätzlich die Partikelporosität berücksichtigt. Letztere ist sehr wichtig im Hinblick auf die angesprochenen Produkteigenschaften. Basierend auf den genannten Modellen, wurden Regelungskonzepte entwickelt: Mit Hilfe von Regelungs-Lyapunov-Funktionen wurde in [2] der mittlere Agglomeratdurchmesser, sowie die Durchflussrate geregelt.

Ein alternativer Regelungsansatz wurde in [3] für die Partikeldurchmesser, sowie in [5] für Partikeldurchmesser und Porosität entwickelt. Dafür wurde das nichtlineare Prozessmodel datenbasiert durch lineare Modelle angenähert, welche anschließend für Modelprädiktive Regelung genutzt wurden. Eine spezielle Herausforderung ist die nicht-Minimalphasigkeit der linearen Modelle, welche in Kombination mit relativ großen Modellunsicherheiten, eine konservative Regelerauslegung erfordern, um Stabilität des geschlossenen Regelkreises zu gewährleisten.

Literatur

[1] E. Otto et al. „Kernel identification in continuous fluidized bed spray agglomeration from steady state data“. In: *Advanced Powder Technology*. 2021.

[2] E. Otto et al. „Discrepancy-based control of particle processes“. In: *Journal of Process Control*. 2022.

[3] E. Otto et al. „Dynamic mode decomposition based MPC of fluidized bed spray agglomeration“. In: *IFAC-PapersOnLine.* 2024.

[4] E. Otto et al. „Population Balance Modeling of Particle Size and Porosity in Fluidized Bed Spray Agglomeration“. In: *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2024.

[5] E. Otto et al. „Koopman-based control of agglomerate size and porosity in continuous fluidized bed spray agglomeration processes“. Submitted to the *23rd IFAC World Congress.* 2026.

A Concept for Distributed Application of Semantic Matching in Digitalized Production

Sebastian Heppner

Chair of Information and Automation Systems
for Process and Material Technology
RWTH Aachen University
s.heppner@iat.rwth-aachen.de

Tobias Kleinert

Chair of Information and Automation Systems
for Process and Material Technology
RWTH Aachen University
kleinert@iat.rwth-aachen.de

Keywords: Semantic Interoperability, Semantic Matching, Federation

Various models for defining levels of interoperability in industrial data and automation systems exist in the literature, and a detailed comparison is provided in [1]. Despite differing terminology, all models distinguish three common levels: **physical data transport** (level 1), **syntactic data exchange** (level 2), and **semantic interoperability**, which concerns the shared understanding of exchanged information (level 3). An analysis in [2] shows that levels 1 and 2 can be achieved with current technologies, while level 3 remains an open challenge addressed in ongoing research and industrial initiatives, such as DPP4.0 [21] and Manufacturing-X [22]. A central difficulty is the handling of heterogeneous vocabulary resources with differing term definitions.

A review of standards, specifications, and domain-specific literature was conducted to identify and systematically classify relevant sources of semantic descriptions, ensuring that the selection is transparent and repeatable. Based on this review, the following classes of semantic description sources relevant to industrial data exchange are identified and analyzed: **dictionaries** (*e.g.*, IEC 61360 CDD [3], ECLASS [4]), **formal logic languages** (*e.g.*, RDF [5], OWL [6]), **modeling languages** (*e.g.*, UML [7], SysML [8]), and **domain models** (*e.g.*, AAS [9], AML [10], OPC UA [11]).

Semantic matching is a widely recognized challenge in industrial data exchange and has been addressed in applied research projects such as BaSys4FluidSim [12] and BaSys4Transfer[1]. In parallel, a dedicated guideline on semantic matching is currently being developed by VDI/VDE GMA (VDI/VDE 2190-3)[2]. Several matching methods are treated in literature, including **exact matching** [9], manually defined **equivalence tables** [13], semantic equivalence relations in **OWL** [14], employment of machine learning techniques, including specialized **natural language processing** models [15] and **large language models** for semantic matching [16].

Despite the availability of diverse semantic matching methods, there is currently no concept for aligning, comparing, and exposing these methods through a common interface. As a result, interoperability across different sources of semantic descriptions remains limited. This contribution[3] proposes a **federated system of services** that collectively provide and maintain semantic matches for a given domain, context, and use case.

---

[1] https://www.iese.fraunhofer.de/de/referenz/basys4transfer.html
[2] https://www.vdi.de/2190
[3] Prototype at: https://github.com/s-heppner/semantic-alignment-core

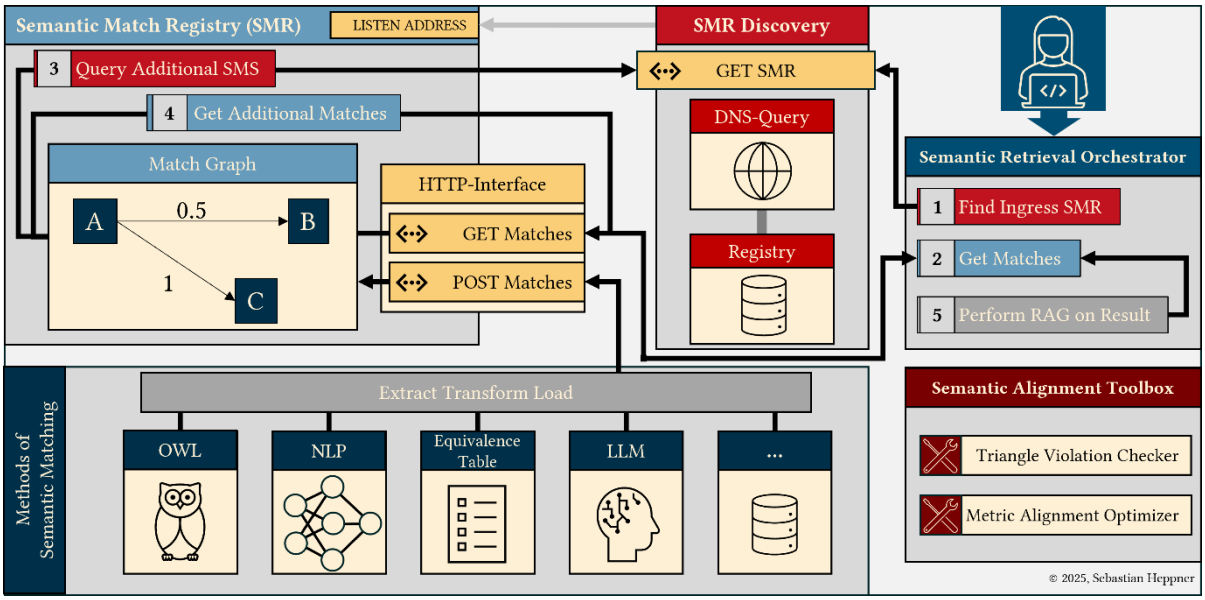


Figure 1 Overview over the proposed concept for the distributed application of semantic matching

In the concept, semantic matching methods are accessed through a standardized S**emantic Matching Interface** [17] based on the Industrie 4.0 Service Model [18], which abstracts heterogeneous techniques by offering uniform input and output structures. This interface is realized by **Semantic Match Registry (SMR)** services (light blue in Figure 1), which aggregate semantic matches produced by different methods and expose them to users.

As the interpretation of semantic similarity varies across systems and application contexts, the establishment of a single global SMR is considered unrealistic. Instead, semantic matches are distributed across multiple SMRs operated by different organizations, for example within dataspaces, allowing interoperability to be improved while preserving data sovereignty [19]. To enable semantic matching in this distributed setting, an algorithm inspired by **distance-vector routing** [20] is employed, in which semantic similarity scores are propagated multiplicatively across SMRs to derive compound similarity measures.

Within each SMR, semantic matches are represented as a directed, weighted graph, where nodes correspond to entities and edge weights denote similarity scores in the range [0, 1]. Additional meta-information, such as the similarity metric used, is stored to support result interpretation and further analysis. Routing-based similarity propagation yields coherent semantic matches on **max-product transitive** [23] similarity graphs. Since real-world data frequently violates this assumption, maintenance mechanisms are introduced to verify the consistency of semantic matches and to align heterogeneous similarity metrics originating from different matching methods. This functionality is provided by the **Semantic Alignment Toolbox** (dark red in Figure 1).

Figure 1 illustrates the resulting architecture and the interaction of its components. To retrieve semantic matches, a client such as the **Semantic Retrieval Orchestrator** (dark blue) first queries an **SMR Discovery Service** (red) to identify an appropriate SMR and then requests the relevant similarity information [14]. As each SMR contains only a subset of the global semantic match graph, the contacted service acts as an ingress point into a federated network of SMRs and recursively queries other services using the distance-vector-based propagation

algorithm until a predefined cutoff threshold is reached. The aggregated results are then analyzed and filtered using **Retrieval Augmented Generation (RAG)** techniques before being presented to the user [16]. The modular structure of the architecture enables flexible component replacement and adaptation to different application scenarios.

The concept was evaluated in a proof-of-concept setup using the ECLASS dictionary [4], demonstrating its applicability to industrial use cases such as the design and implementation of technical systems.

References

[1] T. Miny, “Konzept für die semantische Interoperabilität zwischen Informationsmodellen,” PhD Thesis. VDI Verlag, 2022.

[2] T. Miny, M. Thies, S. Heppner, I. Gamaev, L. Möller, and T. Kleinert, “Realisierung und Evaluation des Verwaltungsschalen-Metamodells - Python-SDK PyI40AAS und Lösungen für die praktische Umsetzung,” Journal article. atp magazin, vol. 63, no. 8, pp. 60–67, 2022.

[3] International Electrotechnical Commission, “Common Data Dictionary,” International standard. IEC 61360-4, 2025 [ONLINE]. Available: https://cdd.iec.ch/, Accessed: 2025-06-24.

[4] ECLASS e.V., “ECLASS - Conceptual data model,” Webpage. 2025. [ONLINE]. Available: https://eclass.eu/support/technical-specification/data-model/conceptual-data-model, Accessed: 2025-06-24.

[5] R. Cyganiak, D. Wood, and M. Lanthaler, “RDF 1.1 Concepts and Abstract Syntax,” W3C Recommendation. 2014, [ONLINE]. Available: https://www.w3.org/TR/rdf11-concepts/, Accessed: 2025-11-21.

[6] S. Bechhofer, F. van Harmelen, J. Hendler, I. Horrocks, D. L. McGuinness, P. F. Patel-Schneider, and L. A. Stein, “OWL Web Ontology Language Reference,” W3C Recommendation. 2004, [ONLINE]. Available: http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-ref-20040210/, Accessed: 2025-11-16.

[7] OMG, “Unified Modeling Language (UML) - Version 2.5.1,” Object Management Group Specification. OMG UML 2.5.1, 2017, [ONLINE]. Available: https://www.omg.org/spec/UML/2.5.1/About-UML, Accessed: 2025-11-21.

[8] OMG, “Systems Modeling Language (SysML) - Version 1.6,” Object Management Group Specification. OMG SysML 1.6, 2019, [ONLINE]. Available: https://www.omg.org/spec/SysML/1.6/About-SysML , Accessed: 2025-11-21.

[9] Industrial Digital Twin Association, “Specification of the Asset Administration Shell Part 1: Metamodel,” IDTA specification. IDTA-01 001 version 3.2, 2025, [ONLINE]. Available: https://industrialdigitaltwin.io/aas-specifications/IDTA-01001/v3.2/index.html, Accessed: 2025-07-11.

[10] D. Rainer, AutomationML - The Industrial Cookbook. Berlin / Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2021.

[11] International Electrotechnical Commission, “OPC Unified Architecture,” International Standard. IEC 62 541, 2020.

[12] S. Heppner, T. Miny, T. Kleinert, M. Becker, K. Schmitz, and R. Alt, “Asset Administration Shells as Data Layer for Enabling Automated Simulation-based Engineering,” Conference paper. ETFA, IEEE Industrial Electronics Society, 2023.

[13] ETIM Germany, “Mapping Table ETIM 9.0 to ECLASS 13.0 - Electrical Sector,” Webpage. 2024. Available: https://etim.de/mappingtabelle-etim-9-0-zu-eclass-13-0-sektor-elektro/, Accessed: 2024-11-14.

[14] S. Heppner, M. Sommer, T. Miny, and T. Kleinert, “Konzept zum Matchen von semanticIDs bei semantisch heterogenen Industrie 4.0 Verwaltungsschalen,” Journal article. in Automation 2024, pp. 497–510, VDI Verlag, 2024.

[15] J. Beermann, R. Benfer, M. Both, J. Müller, and C. Diedrich, “Comparison of different natural language processing models to achieve semantic interoperability of heterogeneous asset administration shells,” Conference paper. INDIN, IEEE Industrial Electronics Society, 2023.

[16] S. Heppner, T. Miny, T. Kleinert, A. Zholdybayev, and M. Ristin, “Refining NLP Semantic Matches through Dialogue with Large Language Models,” Conference paper. ICPS, IEEE Industrial Electronic Society, 2025.

[17] S. Heppner, M. Both, T. Miny, J. Müller, C. Diedrich, and T. Kleinert, “Semantic Matching Interface für semantisch heterogene Industrie 4.0 Verwaltungsschalen,” Journal article. at Automatisierungstechnik, vol. 72, no. 10, 2024.

[18] Industrial Digital Twin Association, “Specification of the Asset Administration Shell - Part 2: Application Programming Interfaces (Version 3.0)”, IDTA specification. IDTA-01 002 version 3.0, 2023.

[19] S. Steinbuss, W. van den Berg, S. G. Berwanger, S. Bilbao Arechabala, I. Fernandez, G. Gil Inchaurza, P. Klinker, V. Lähteenoja, A. Müller, M. Stornebrink, and A. Turkmayali, “Semantic Interoperability in Data Spaces,” International Data Spaces Association Position Paper, 2024.

[20] G. S. Malkin, “RIP Version 2,” Request for Comments. RFC 2453, 1998. Available: https://www.rfc-editor.org/info/rfc2453, Accessed: 2025-05-19.

[21] K. Garrels, S. Grüner, A. Orzelski and J. Reinschmidt, “DPP 4.0: An Architecture Proposal for a DPPSystem to implement the EU Digital Product Passport for Industrial Products,” ZVEI Discussion Paper. Verband der Elektro- und Digitalindustrie, 2023.

[22] Plattform Industrie 4.0, “Key points for the implementation of Manufacturing-X in the goods-producing sector to secure Germany’s position as a competitive location for industry,” White Paper on Manufacturing-X. German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK), 2022.

[23] D. Dubois and H. Prade, “Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications,” Mathematics in Science and Engineering, vol. 144, 1980.

Automatisierter Entwurf von Steuerungssystemen auf Basis eines digitalen Zwillings

Andreas Köhler

Universität Duisburg-Essen
Fachgebiet Automatisierungstechnik und komplexe Systeme
andreas.koehler@uni-due.de

Ping Zhang

Universität Duisburg-Essen
Fachgebiet Automatisierungstechnik und komplexe Systeme
ping.zhang@uni-due.de

Schlüsselwörter: Ereignisdiskrete Systeme, automatisierter Steuerungsentwurf, digitaler Zwilling, Petrinetze

Moderne Produktfertigung ist in hohem Maße auf eine schnelle und wirtschaftliche Produktion vielfältiger Produkte angewiesen. Vor diesem Hintergrund ist eine schnelle Anpassung der Steuerungsalgorithmen in flexiblen Fertigungsanlagen unerlässlich. Um eine automatisierte Anpassung der Steuerungsalgorithmen durchzuführen, ist zum einen eine aussagekräftige Modellierung der Fertigungsanlage und zum anderen eine systematische Methode zur Umwandlung der neuen Anlagenanforderungen in Steuerungsalgorithmen essentiell.

Digitale Zwillinge wurden bis jetzt für die virtuelle Inbetriebnahme, die Simulation und Verifikation, die Überwachung und Zustandsanalyse sowie die Optimierung von Prozessen und Prozessparameter eingesetzt. Dieser Vortrag präsentiert eine neuartige Anwendung des digitalen Zwillings für den automatisierten Steuerungsentwurf.

Im Vortrag wird zuerst ein modular aufgebauter digitaler Zwilling vorgestellt. Die Fertigungsanlage wird in Arbeitsstationen aufgeteilt, wobei jede Arbeitsstation wiederum aus mehreren Komponenten (z. B. Bearbeitungsmaschine, Drehtisch, Fließband usw.) besteht. Jede Komponente wird durch ein signalinterpretiertes Petrinetz (SIPN) modelliert. Das *Component SIPN* beschreibt das Verhalten der Komponente unter unterschiedlichen Aktuatoreingängen. Jede Arbeitsstation wird durch ein sogenanntes *Function SIPN* dargestellt, welches die durch diese Arbeitsstation durchführbaren Spezifikationen sowie die entsprechend notwendigen Sensorsignalfolgen aufzeigt [1], [2].

Basierend auf dem digitalen Zwilling wird ein Verfahren zum automatisierten Steuerungsentwurf vorgestellt, das eine in natürlicher Sprache gegebene Sequenz von Spezifikationen in Steuerungsalgorithmen umwandelt. Zunächst transformiert der Tracking-Control-Ansatz in [3] mittels Function SIPNs die natürlichsprachlichen Spezifikationssequenz in benötigte Sensorsignalfolgen. Mit Hilfe der Component SIPNs werden anschließend die Aktuatoreingänge ermittelt, welche die benötigten

Sensorsignalfolgen erzeugen, und die entsprechenden Steuerungs-Snippets generiert. Um die Interaktion zwischen den Komponenten sicherzustellen, erfolgt zunächst die Erweiterung der Steuerungs-Snippets um Kommunikationssignale, gefolgt von einer Zusammenführung und Pruning der Steuerungs-Snippets zur Reduktion der Komplexität der Steuerung. Das Verfahren wird an einer Laboranlage mit 22 Arbeitsstationen und 215 I/Os demonstriert.

Das vorgestellte Verfahren für den automatisierten Steuerungsentwurf eignet sich nicht nur für die flexiblen Produktionsanlagen, sondern auch für die fehlertolerante Steuerung [2], [4]. Zu diesem Zweck werden das Konzept eines Spezifikations-Governors und das SIPN-basierte Fehlerdiagnoseverfahren entwickelt [5], [6].

Literatur

[1] A. Köhler, R. Fritz and P. Zhang, "An approach to design distributed logic controllers for large-scale manufacturing systems," in *Proc. of 2021 American Control Conference*, New Orleans, USA, 2021.

[2] A. Köhler, Fault-Tolerant Control of Large-Scale Manufacturing Systems. A Signal Interpreted Petri Net Approach, Logos Verlag Berlin, 2025.

[3] R. Fritz and P. Zhang, "Tracking controller design for Petri nets with inputs and outputs," in *Proc. of 2020 American Control Conference*, Denver, USA, 2020.

[4] A. Köhler, P. Zhang and R. Fritz, "Specification governor for fault tolerant control of large-scale manufacturing systems," *European Journal of Control,* vol. 62, p. 198–205, 2021.

[5] A. Köhler and P. Zhang, "Fault diagnosis in discrete event systems modeled by signal interpreted Petri nets," in *IFAC-PapersOnLine*, vol. 62, issue 2, p. 4576-4581, 2023.

[6] A. Köhler and P. Zhang, "Fault Diagnosis Based on Time Signal Interpreted Petri Nets," in *Proc. of 2025 IEEE Conference on Decision and Control*, Rio de Janeiro, Brasilien, 2025.

Tropical-Algebraic Method for the Control of Discrete-Event Systems with Resource Sharing under Flexible Priorities

Germano Schafaschek

Lehrstuhl für Regelungstechnik

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

germano.schafaschek@fau.de

Thomas Moor

Lehrstuhl für Regelungstechnik

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

thomas.moor@fau.de

Keywords: Just-in-time control, timed event graphs, tropical algebra, resource sharing, discrete-event systems

Discrete-event systems (DES) are characterized by a dynamic evolution governed by the sequential occurrence of events that cause instantaneous transitions among a discrete set of states [1]. Typical examples of real-world systems suitable to be modeled as DES are human-made ones found in the context of manufacturing, transportation, and computer networks. Even though the dynamics of DES is event-driven, in many applications time does play a crucial role, for example for performance evaluation, deadline enforcement, or scheduling of time-sensitive tasks. This has led to the emergence of timed versions for some of the formalisms most commonly used to model such systems. In particular, in this talk the basic building blocks for the considered models are Timed Event Graphs (TEGs), a subclass of timed Petri nets particularly well-suited to model synchronization and delay phenomena. One significant advantage of TEGs is the well-known fact that, in a suitable mathematical framework — namely, a tropical-algebraic setting such as the min-plus algebra — their evolution can be described by linear equations [2]. Moreover, by partitioning the transitions of a TEG into input, internal, and output ones, these linear equations take the form of a linear state-space model of the system. Based thereon, an elaborate control theory has become available for this subclass of DES, carrying over some key concepts from classical systems and control theory; these include transfer functions and transfer matrices, reference-tracking control, model predictive control, state estimation, and disturbance rejection via output or state feedback [3]. This talk shall focus on optimal reference-tracking control, with optimality being understood in a *just-in-time* sense, i.e., the goal is to fire all input transitions as late as possible while guaranteeing that the firing of output transitions is not later than specified by a reference signal. In a manufacturing context, for instance, the firing of an input transition may correspond to the provisioning of raw material, whereas the firing of an output transition signifies the completion of a product. In general, a just-in-time policy aims at satisfying customer demands while minimizing internal stocks and idle waiting times.

In spite of the aforementioned advantages of TEGs, they do, nonetheless, present limitations, a key one being the fact that a TEG alone cannot model concurrency or choice and hence is inapt to capture resource-sharing phenomena. The fact that shared resources are ubiquitous in scenarios of practical relevance has motivated considerable effort toward overcoming this limitation, leading to adaptations and enhancements of TEG-based approaches in order to encompass systems with shared resources [4,5,6]. The method presented in [7] allows to obtain optimal inputs for system in which a number of component subsystems,

each modeled as a TEG, share one or more resources while operating concurrently. Output-reference signals are given for each individual subsystem, and the objective is to obtain optimal (just-in-time) inputs for all of them. The dispute for shared resources is deterministically settled by establishing a priority hierarchy among the subsystems, and by enforcing a simple policy: lower-priority users cannot interfere with the operation of higher-priority ones.

The method from [7] is predicated on the fact that the priority hierarchy among the subsystems competing for access to the joint resources remains fixed throughout the operation of the system. In our latest developments, we have generalized the results from [7] to allow for a flexible priority scheme. More precisely, the priority level of any of the subsystems may be arbitrarily changed during the operation; the new method provides a formal and systematic way to optimally recompute and update the inputs accordingly. The talk will culminate in a brief presentation and discussion of these more recent results.

References

[1] C. G. Cassandras and S. Lafortune. *Introduction to Discrete Event Systems*. Springer-Verlag, 2006.

[2] F. Baccelli, G. Cohen, G. J. Olsder, and J.-P. Quadrat. *Synchronization and Linearity: an Algebra for Discrete Event Systems*. Wiley, 1992.

[3] L. Hardouin, B. Cottenceau, Y. Shang, and J. Raisch. Control and state estimation for max-plus linear systems. *Foundations and Trends in Systems and Control* 6.1 (2018), pp. 1–116.

[4] T. J. J. van den Boom and B. De Schutter. Modelling and control of discrete event systems using switching max-plus-linear systems. *Control Engineering Practice* 14.10 (2006), pp. 1199–1211.

[5] A Corréïa, A. Abbas-Turki, R. Bouyekhf, and A. El Moudni. A dioid model for invariant resource sharing problems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 39.4 (2009), pp. 770–781.

[6] W. M. Boussahel, S. Amari, and R. Kara. Analytic evaluation of the cycle time on networked conflicting timed event graphs in the (max,+) algebra. *Discrete Event Dynamic Systems* 26.4 (2016), pp. 561–581.

[7] G. Schafaschek, L. Hardouin, and J. Raisch. Optimal control of timed event graphs with resource sharing and output-reference update. *at – Automatisierungstechnik* 68.7 (2020), pp. 512–528.

Die Bedeutung der technischen Self-Awareness für autonome Fahrzeuge

Richard Schubert, M. Sc.
Institut für Regelungstechnik
TU Braunschweig
richard.schubert@tu-braunschweig.de

Prof. Dr.-Ing. Markus Maurer
Institut für Regelungstechnik
TU Braunschweig
markus.maurer@tu-braunschweig.de

Schlüsselwörter:
Self-Awareness, Selbstwahrnehmung, Selbstadaptivität, automatisiertes Fahren

Automatisiertes Fahren auf SAE-Level 4 stellt eine große technologische Herausforderung dar, da Fahrzeugsysteme die Fahraufgabe vollständig ohne menschliche Überwachung bewältigen müssen. Die Komplexität der angedachten Operationsdomäne, unvollständiges Wissen darüber sowie weitere Entwicklungs- und Laufzeitunsicherheiten erfordern innovative Ansätze zur Systemüberwachung und -anpassung im Betrieb. Vielversprechende Systemfähigkeiten für den Umgang mit diesen Unsicherheiten stellen in der Literatur die sogenannte „technische Self-Awareness“ und die „Selbstadaptivität“ dar.

Erstere bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, seinen eigenen Zustand und Kontext zu repräsentieren, während Selbstadaptivität dessen Fähigkeit beschreibt, das Verhalten auf Grundlage dieser Informationen anzupassen. Beide Konzepte werden als unverzichtbar für Cyber-physikalische Systeme erachtet, um Unsicherheiten in einem offenen Betriebskontext zu bewältigen. Auch bei KI-basierten Systemen, die zunehmend in automatisierten Fahrzeugen eingesetzt werden, stellt sich die Frage, wie Formen von Self-Awareness und Selbstadaptivität gewinnbringend etabliert werden können.

In diesem Vortrag wird die Realisierung von Systemen mit Self-Awareness und Selbstadaptivität für automatisierte Fahrzeuge adressiert. Die Motivation für diesen Vortrag ergibt sich aus mehreren Aspekten, die auch in regulatorischen Anforderungen abgedeckt werden, wie z. B. der Abwesenheit des menschlichen Fahrers und der Notwendigkeit zur Information einer technischen Aufsicht. In der vorgestellten Forschungsarbeit erfolgt

- eine terminologische Betrachtung, die Self-Awareness gegenüber Selbstadaptivität und Selbstwahrnehmung abgrenzt, und anschlussfähige Definitionen für die Domäne des automatisierten Fahrens einführt,
- eine architekturgetriebene Betrachtung, die konkrete Anforderungen an Fähigkeiten und implementierte Elemente eines Systems mit Self-Awareness im Kontext einer Mehrsichtenarchitektur einführt,
- die abschließende Präsentation eines Fallbeispiel zur Realisierung fähigkeitsbasierten Verhaltens im Kontext der fehlertoleranten Bewegungsregelung automatisierter Fahrzeuge.

A Real-Time Control Barrier Function-Based Safety Filter for Motion Planning with Arbitrary Road Boundary Constraints

Jianye Xu

Lehrstuhl für Embedded Software

RWTH Aachen
xu@embedded.rwth-aachen.de

Bassam Alrifaee

Professur für Adaptives Verhalten autonomer Fahrzeuge
Universität der Bundeswehr München
bassam.alrifaee@unibw.de

Schlüsselwörter: Control barrier function, motion planning, safety filter

Motion planning for autonomous vehicles must satisfy safety constraints in environments with complex road geometry [1]. Road boundaries are often represented as polylines, i.e., connected discrete points. This representation complicates safety certification because distance-to-boundary measures can be nonsmooth at polyline junctions. Learning-based motion planning, including Reinforcement Learning (RL), typically lacks formal safety guarantees [2]. In our work [3], we present a real-time Control Barrier Function (CBF)-based safety filter that certifies a nominal motion planner against road-boundary collisions. Given a nominal control action, our safety filter computes a certified action that minimally deviates from the nominal one while enforcing safety. We employ a Pseudo-distance [4] to construct a smooth and differentiable CBF that handles road boundaries represented as polylines of arbitrary geometry. We approximate the vehicle footprint by a set of circles and enforce circle-to-boundary safety via a Quadratic Program (QP).

We numerically validate our safety filter in traffic scenarios with complex road-boundary geometry. Specifically, we trained an unsafe RL policy in our SigmaRL framework [5]. While this RL policy caused more than 30 road-boundary collisions per minute, our safety filter prevented all of them. The safety filter, implemented in Python with a QP solver [6], runs in real time at up to 40 Hz. Figure 1 visualizes the vehicle footprint of a 30-second simulation for the unsafe RL policy, with collisions depicted in green (29 in total). Our safety filter avoids all collisions, as demonstrated in Fig. 2. Figures 3 and 4 visualize the RL and CBF actions, with arrow length corresponding to the target speed. For a safe RL action, our safety filter remains inactive, and the two arrows in Fig. 3 overlap. For an unsafe RL action, our safety filter becomes active and corrects it, as depicted in Fig. 4. The code for reproducing the simulation results and a video demonstration are publicly available[1].

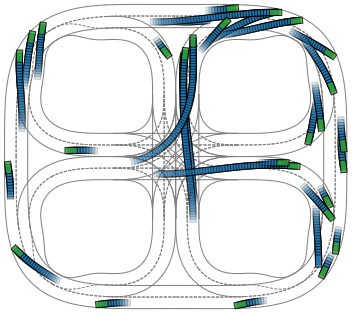


Fig. 1: An unsafe RL policy, without our safety filter.

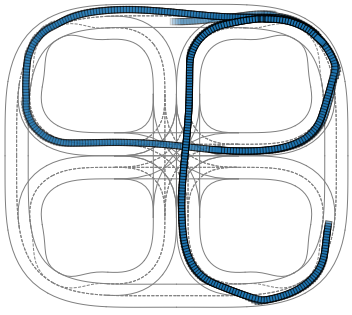


Fig. 2: The unsafe RL policy, with our safety filter.

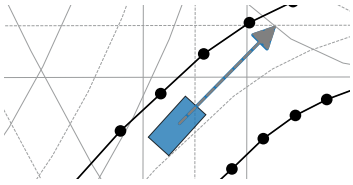


Fig. 3: Inactive safety filter.

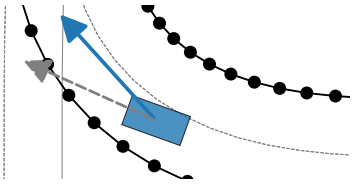


Fig. 4: Active safety filter.

[1] https://github.com/bassamlab/SigmaRL

Literatur

[1] B. Paden, M. Cáp, S. Z. Yong, D. Yershov, and E. Frazzoli, “A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles,” IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, vol. 1, no. 1, pp. 33–55, 2016.

[2] P. Koopman and M. Wagner, “Autonomous vehicle safety: An interdisciplinary challenge,” IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 9, no. 1, pp. 90–96, 2017.

[3] J. Xu, C. Che, and B. Alrifaee, “A Real-Time Control Barrier Function-Based Safety Filter for Motion Planning with Arbitrary Road Boundary Constraints,” in 2025 IEEE 28th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2025, in press.

[4] J. Ziegler, P. Bender, T. Dang, and C. Stiller, “Trajectory planning for Bertha—a local, continuous method,” in 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, 2014, pp. 450–457.

[5] J. Xu, P. Hu, and B. Alrifaee, “SigmaRL: A sample-efficient and generalizable multi-agent reinforcement learning framework for motion planning,” in 2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2024, pp. 768–775.

[6] S. Diamond and S. Boyd, “CVXPY: A Python-embedded modeling language for convex optimization,” Journal of Machine Learning Research, vol. 17, no. 83, pp. 1–5, 2016.

Ereignisdiskrete Entscheidungsfindung für autonome Fahrzeuge an nicht-signalisierten Konfliktstellen

Daniel Leyer

Institut für Industrielle Informationstechnik
Karlsruher Institut für Technologie
daniel.leyer@kit.edu

Michael Heizmann

Institut für Industrielle Informationstechnik
Karlsruher Institut für Technologie
michael.heizmann@kit.edu

Schlüsselwörter: Ereignisdiskretes Systemmodell, automatisches Fahren, Entscheidungsmodell

Der vorgestellte Ansatz demonstriert ein ereignisdiskretes Entscheidungsmodell für autonome Fahrzeuge in nicht-signalisierten, potenziell mehrdeutigen Verkehrssituationen. Zentrales Prinzip ist die Abbildung komplexer Interaktionen in logisch definierte Ereignisse und wohldifferenzierte Zustände, die den Fahrzeugkontext entlang relevanter Zonen strukturieren. Dadurch werden Fahrentscheidungen transparent, konsistent und parametrierbar. Sie lassen sich gezielt an gewünschte Fahrstile, Verkehrsregeln und Verkehrsdichte anpassen und bleiben zugleich robust gegenüber Unsicherheiten und abweichendem Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer. Da keine explizite Kommunikation zwischen Fahrzeugen verwendet wird, basieren alle Entscheidungen ausschließlich auf Vorwissen sowie eigenständig erfassten Wahrnehmungsdaten und den daraus abgeleiteten, formal definierten Ereignissen und Zuständen. Die Verhaltensgenerierung koppelt zustandsspezifische Zielgeschwindigkeiten mit einer kontinuierlichen Beschleunigungsregel und integriert Einschränkungen durch vorausfahrende oder blockierende Fahrzeuge, sodass Annähern, Halten, Einfahren, Passieren und Ausfahren sicher und flüssig koordiniert werden.

Im gemeinsamen Einsatz mit anderen nicht automatisierten Fahrzeugen zeigt sich, dass die ereignisdiskrete Modellierung vor allem in Situationen ohne Signalisierung Vorteile bietet: Vorrangbeziehungen werden explizit abgebildet, Ambiguitäten früh erkannt und, falls notwendig, durch vorbereitetes Anhalten und geordnete Priorisierung aufgelöst. Deadlock-Konstellationen (siehe Abb.1) werden als spezifische Ereignismuster identifiziert und nach definierter Wartezeit kooperativ und konfliktfrei aufgelöst. Durch die entkoppelte Modellierung von Wahrnehmungsmerkmalen, Ereignissen und Zustandslogik entsteht eine hohe Übertragbarkeit auf unterschiedliche Formen von Konfliktstellen wie beispielsweise Kreuzungen oder Kreisverkehre. Die Implementierung in einer, bei Fragestellungen des autonomen Fahrens bewährten,

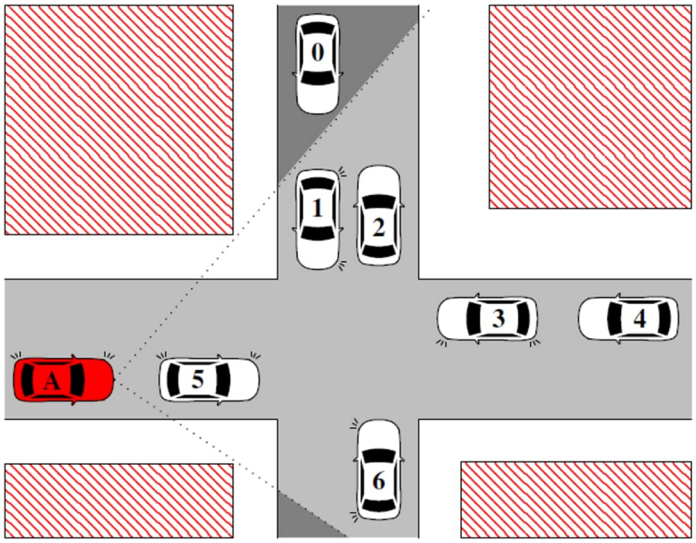


Abbildung 1: Exemplarische Verklemmungssituation an einer X-Kreuzung zwischen den Fahrzeugen 1,5,6 und 3.

Verkehrssimulation ermöglicht eine enge Rückkopplung zwischen Entscheidung und Fahrdynamik sowie belastbare Auswertungen unterschiedlicher Geometrien, Verkehrsaufkommen sowie Startbedingungen.

Im Vortrag werden u.a. Ergebnisse aus der ereignisdiskreten Simulation von Kreuzungen und Kreisverkehren gezeigt. Die erhaltenen Erkenntnisse unterstreichen den Nutzen der ereignisdiskreten Entscheidungsfindung. Sicherheit und Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen profitieren von der klaren Ereignis- und Zustandslogik, ohne das Fahrverhalten unnötig zu konservativ zu machen. Effizienzmetriken entwickeln sich erwartungskonform mit zunehmender Komplexität der Geometrie und höheren Verkehrsaufkommen, dabei bleibt die Fahrreihenfolge stets regelkonform und alle Interaktionen werden ohne Kollisionen aufgelöst. In Mischverkehrsszenarien führt die explizite Modellierung von Vorrang-, Warte- und Blockierbeziehungen zu belastbarer Robustheit gegenüber variierenden Fahrstilen und Sonderverhalten konventioneller Verkehrsteilnehmer, wobei Komfort und Sicherheit innerhalb plausibler Bandbreiten gehalten werden. Insgesamt belegt der Ansatz, dass ereignisdiskrete Entscheidungsmodelle eine tragfähige, skalierbare und leicht interpretierbare Grundlage für autonome Fahrentscheidungen in nicht-signalisierten Konfliktstellen darstellen, mit klaren Perspektiven für die Ausweitung auf weitere Verkehrssituationen und die Validierung mit realen Daten.

Literatur

[1] H. Weinreuter, B. Szigeti, N.-R. Strelau, B. Deml und M. Heizmann. „Decision making at unsignalized inner city intersections using discrete events systems” In: tm -Technisches Messen. 2022. doi:10.1515/teme-2021-0140

[2] H. Weinreuter. „Driver Behavior Analysis and Decision-Making for Autonomous Driving at Non-Signalized Inner City Intersections” Dissertation: KIT Scientific Publishing. 2024. doi:10.5445/KSP/1000175979

[3] D. Leyer, H. Weinreuter, M. Heizmann. „Event Discrete Decision-Making for Autonomous Vehicles at Non-Signalized Intersections” In: Proceedings of ICITT. 2024. doi:10.3233/ATDE241213

Optimale fehlertolerante Regelung für permanenterregte Synchronmaschinen

Martin Ackermann

Automatisierungs- und Regelungstechnik
Universität der Bundeswehr München
martin.ackermann@unibw.de

Claus Hillermeier

Automatisierungs- und Regelungstechnik
Universität der Bundeswehr München
claus.hillermeier@unibw.de

Schlüsselwörter: Fehlertolerante Regelung, Permanenterregte Synchronmaschinen, Maxwell'sche Gleichungen, Optimierungsprobleme unter Nebenbedingungen

Fehlertolerante elektrische Antriebssysteme sind für sicherheitskritische Anwendungen unverzichtbar, da sie auch bei kritischen Fehlerfällen betriebsbereit bleiben müssen. Ihre Bedeutung nimmt stetig zu, insbesondere seitdem durch den globalen Trend zur Dekarbonisierung neue Technologien wie elektrifizierte Flugzeuge eine immer größere Rolle spielen. Das Projekt ELAPSED des Zentrums für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr (dtec.bw), in dessen Rahmen diese Arbeit entstand, widmet sich diesem letztgenannten Ziel.

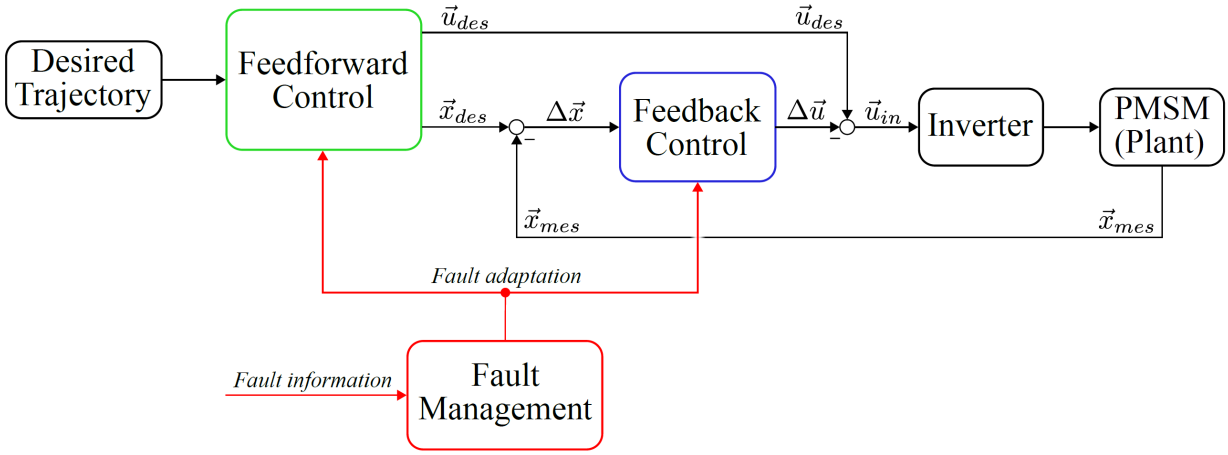


Abbildung 1: Aufbau der optimalen fehlertoleranten Regelung.

Im Vortrag wird das Konzept einer optimalen fehlertoleranten Regelung für Permanenterregte Synchronmaschinen (PMSMs) vorgestellt. Die methodische Grundlage bildet hierbei das Subdomain Model, welches die Maxwell'schen Gleichungen löst und damit eine hochgenaue Berechnung des magnetischen Flusses ermöglicht. Auf Basis dieses Modells wird eine Vorsteuerung und eine Regelung entworfen, die eine präzise Einregelung vorgegebener mechanischer Trajektorien gewährleisten.

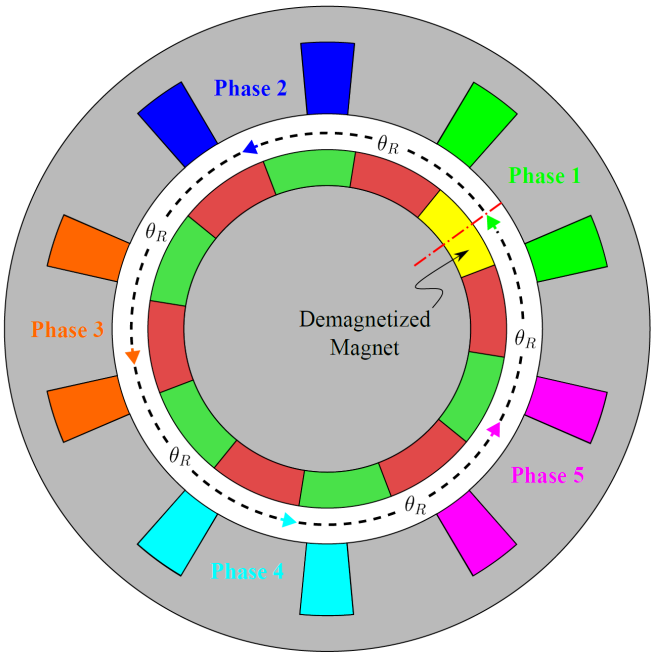


Abbildung 2: Fehlerhafte PMSM mit einem demagnetisierten Magneten.

Indem die detaillierte elektromagnetische Modellierung der PMSM effizient mathematisch formuliert und in Optimierungsprobleme unter Nebenbedingungen eingebaut wird, lässt sich das Regelungssystem mit minimalem Anpassungsaufwand an verschiedene elektrische und magnetische Fehlerzustände adaptieren. Diese verallgemeinerte Struktur erlaubt nicht nur die Kompensation einzelner Fehlertypen, wie etwa einer lokalen Demagnetisierung, sondern auch die simultane Behandlung mehrerer Fehler, wodurch eine mehrfehlertolerante Regelung realisiert wird.

[1] M. Ackermann, J.-L. Marqués, and C. Hillermeier. “Optimal multi-fault tolerant control for PMSMs – Part I: Feedforward control”. In*: 2024 IEEE 21st International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*. IEEE, Sept. 2024, pp. 1– 9.

[2] M. Ackermann, J.-L. Marqués, and C. Hillermeier. “Optimal multi-fault tolerant control for PMSMs – Part II: Feedback control”. In: *2024 IEEE 21st International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*. IEEE, Sept. 2024, pp. 1–7.

[3] M. Ackermann, J.-L. Marqués, and C. Hillermeier. “Adaptation of a multi-fault tolerant control for PMSMs to phase short circuits”. In*: IECON 2025 – 51st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.* IEEE, Oct. 2025, pp. 1–8.

[4] M. Ackermann, J.-L. Marqués, and C. Hillermeier. “Multi-Fault Tolerant Control for PMSMs Considering Interturn Short Circuits”. In: *2025 IEEE 34th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE).* IEEE, June 2025, pp. 1–7.

Theoretische Sicherheitsgarantien in der Multi-Task Bayesschen Optimierung

Jannis Lübsen
Institut für Regelungstechnik
Technische Universität Hamburg
jannis.luebsen@tuhh.de

Annika Eichler
Institut für Regelungstechnik
Technische Universität Hamburg
annika.eichler@tuhh.de

Schlüsselwörter: Black-box Optimierung, Regler Optimierung, Bayessche Optimierung

Bayessche Optimierung [5] hat sich in den vergangenen Jahren als leistungsfähige Methode für die Optimierung teurer, black-box Funktionen etabliert. In sicherheitskritischen Anwendungen, von der Robotik bis hin zu Teilchenbeschleunigern, erlaubt *Safe Bayesian Optimization* [3] die Einhaltung von Sicherheitsbeschränkungen während des Optimierungsprozesses mit hoher Wahrscheinlichkeit. Ein gravierender Nachteil ist jedoch die konservative Exploration. Um Sicherheit zu garantieren, muss der Algorithmus die sichere Region langsam und datenintensiv von Grund auf zertifizieren

Dieser Beitrag analysiert die Multi-Task Bayessche Optimierung [4] als Lösung für dieses Effizienzproblem. Durch die Modellierung vektorwertiger Funktionen mittels Multi-Task Gauß-Prozessen (MTGPs) können Informationen aus korrelierten Quellen (z.B. Simulationen) transferiert werden. Der Fokus des Vortrags liegt auf der theoretischen Analyse dieses Ansatzes. Ein kritisches Element ist hierbei die Schätzung der a priori unbekannten Korrelationsstruktur zwischen der Zielfunktion und der Simulation [1,2]. Da Sicherheitsgarantien hochsensibel auf Fehlspezifikationen dieser Hyperparameter reagieren, stellen wir eine robuste theoretische Analyse vor, die den Einfluss von Schätzfehlern auf die sichere Region quantifiziert.

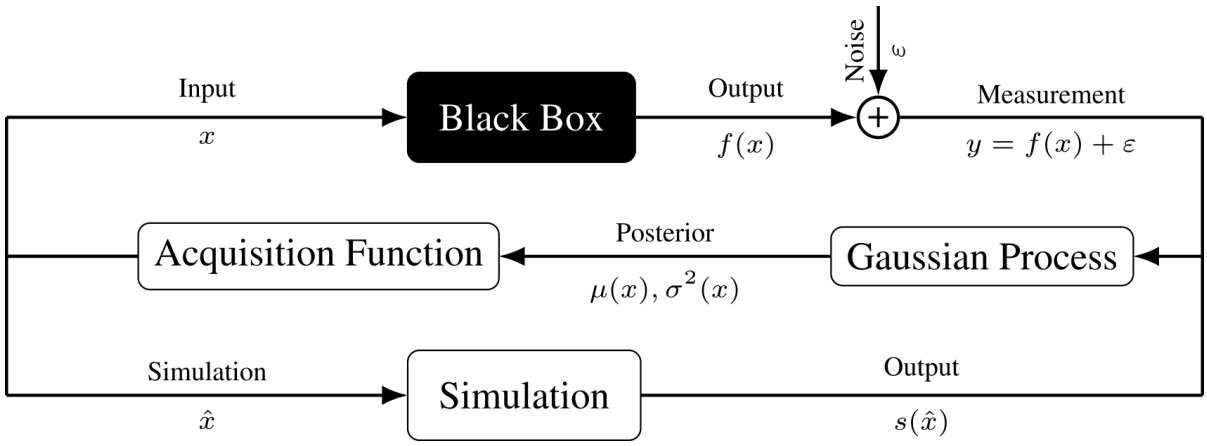


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Multi-Task Bayesschen Optimierungprozesses

Als Anwendungsbeispiel wird das Synchronisationssystem des European X-Ray Free Electron Laser (XFEL) vorgestellt. Durch die Optimierung des Systems mithilfe des vorgestellten Algorithmus, wurde erstmals auf einer Strecke von mehr als 7 km eine Synchronisation von unter einer Femtosekunde erreicht.

Literatur

[1] J. Luebsen et al. “Towards safe multi-task Bayesian optimization”. In *Proceedings of the 6th Annual Learning for Dynamics and Control Conference*

[2] J. Luebsen und A. Eichler. “An analysis of safety guarantees in multi-task bayesian optimization”. Preprint: https://arxiv.org/abs/2503.08555.

[3] A. Lederer et al. “Uniform error bounds for Gaussian process regression with application to safe control”. In *Advances in Neural Information Processing Systems*

[4] K. Swersky et al. “Multi-task Bayesian Optimization”. In *Advances in Neural Information Processing Systems.*

[5] B. Shahriari et al. “Taking the human out of the loop: A review of bayesian optimization”. In *Proceedings of the IEEE*

Adaptive modellbasierte Regelung für das Kunststoffspritzgießen

Jens Ahlers

Institut für Regelungstechnik
RWTH Aachen University
j.ahlers@irt.rwth-aachen.de

Prof. Dr.-Ing. Heike Vallery

Institut für Regelungstechnik
RWTH Aachen University
h.vallery@irt.rwth-aachen.de

Schlüsselwörter: Adaptive Regelung, Nichtlineare modellprädiktive Regelung, Gaußprozessregression, Kunststoffspritzgießen, Rezyklat

Das Spritzgießen ist ein bedeutendes Verfahren zum Urformen von Kunststoffen. Zur Realisierung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft soll zunehmend recyceltes Material (Rezyklat) verarbeitet werden [1]. Rezyklat bietet gegenüber dem sogenannten Virgin-Material den Nachteil, dass sich die Materialeigenschaften durch den Recyclingprozess verändern. Darüber hinaus schwankt die Zusammensetzung des Rezyklats, sodass auch die Materialeigenschaften von Batch zu Batch variieren. Diese sogenannten Batch-zu-Batch-Fluktuationen erfordern eine kontinuierliche Adaption des Prozesses. Neben der Verarbeitung von Rezyklat liegt eine weitere Herausforderung des Spritzgießens in der Vielzahl unterschiedlicher Formen (Werkzeuge) und Materialien, was einen erheblichen initialen Einrichtaufwand durch das maschinenbedienende Personal erfordert. Der herkömmliche Spritzgießprozess unterscheidet unter anderem zwischen der Einspritz- und der Nachdruckphase. In diesen Phasen wird üblicherweise an einem zu definierenden Punkt zwischen der Regelung der Einspritzgeschwindigkeit und der Regelung des Drucks im Schneckenvorraum umgeschaltet.

Um die beschriebenen Herausforderungen zu adressieren, werden unsere Forschungsarbeiten zur phasenvereinenden modellprädiktiven Werkzeuginnendruckregelung (vgl. z. B. [2]) so erweitert, dass zyklisch adaptierende Komponenten die Regelung kontinuierlich an sich ändernde Bedingungen anpassen. In Abbildung 1 ist der Gesamtregelkreis dargestellt.

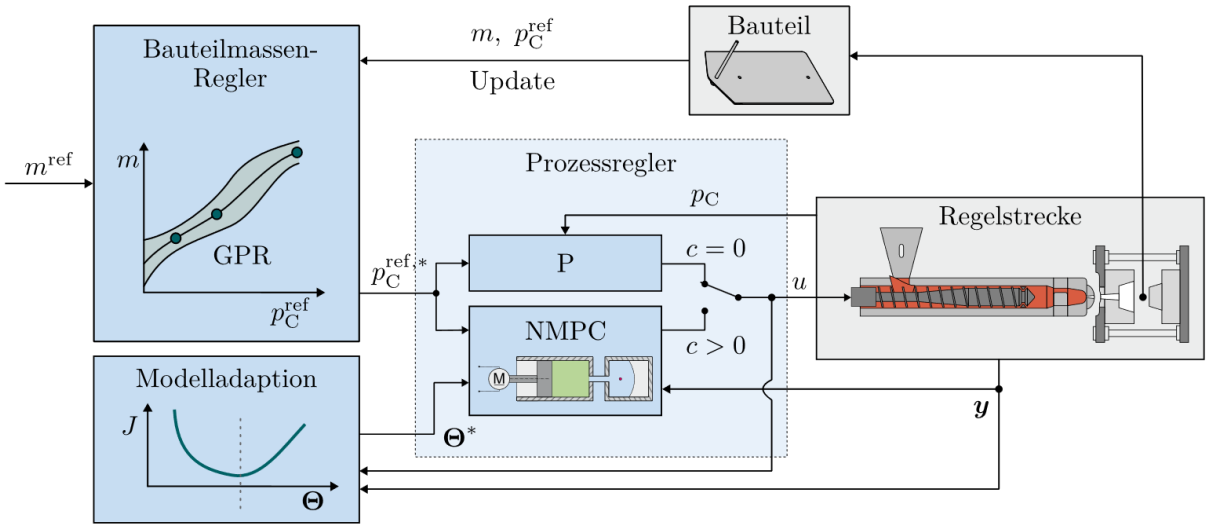


Abbildung 1: Gesamtregelkreis für das Spritzgießen, bestehend aus der Regelstrecke, der Bestimmung der Bauteilqualitätseigenschaften, einem Prozessregler, einem Bauteilmassenregler und der Modelladaption.

Bei der phasenvereinenden Werkzeuginnendruckregelung regelt der Prozessregler den im Werkzeug gemessenen Werkzeuginnendruck p_C während der Einspritz- und Nachdruckphase. Im ersten Zyklus ($c = 0$) wird ein Proportionalregler (P) verwendet, da dieser einfach zu parametrieren ist. Dieser Regler erfüllt jedoch nicht die Anforderungen an einen Dauerbetrieb (wie schnelles Füllen der Kavität, kein Überschießen der Werkzeuginnendruckreferenz und kein Zurückziehen der Schnecke). Der P-Regler dient ausschließlich dazu, initiale Prozessdaten für das vorliegende Material und Werkzeug zu generieren. Diese Daten werden zur Generierung des Prozessmodells der nichtlinearen modellprädiktiven Regelung (NMPC) verwendet, welche in allen folgenden Zyklen eingesetzt wird ($c > 0$). Nach jedem Zyklus wird das Prozessmodell erneut adaptiert. Die Referenz für den Prozessregler wird durch den Bauteilmassenregler bereitgestellt. Dieser enthält ein Gaußprozessregressionsmodell (GPR), welches den Zusammenhang zwischen der Bauteilmasse m und der Werkzeuginnendruckreferenz p_C^{ref} abbildet und durch Messungen aktualisiert werden kann. Das GPR-Modell wird durch einen zyklusvarianten Kernel erweitert, wodurch aktuellere Messungen höher gewichtet werden, um das Modell schneller an Änderungen der Werkstoffeigenschaften anzupassen.

Nach drei Zyklen erreicht der Prozessregler eine ausreichende Regelgüte. Während des unterbrechungsfreien Betriebs und beim Wechsel zwischen Virgin-Material bzw. zwei unterschiedlichen Batches von Rezyklat wird in 50 Zyklen eine durchschnittliche Massenabweichung von 0,21 % von der Referenzmasse m^{ref} erreicht (vgl. Abbildung 2). Dazu werden die Modelle des Prozess- und Bauteilmassenreglers zwischen den Zyklen ohne a priori Kenntnis der Werkzeuggeometrie oder der Materialeigenschaften adaptiert.

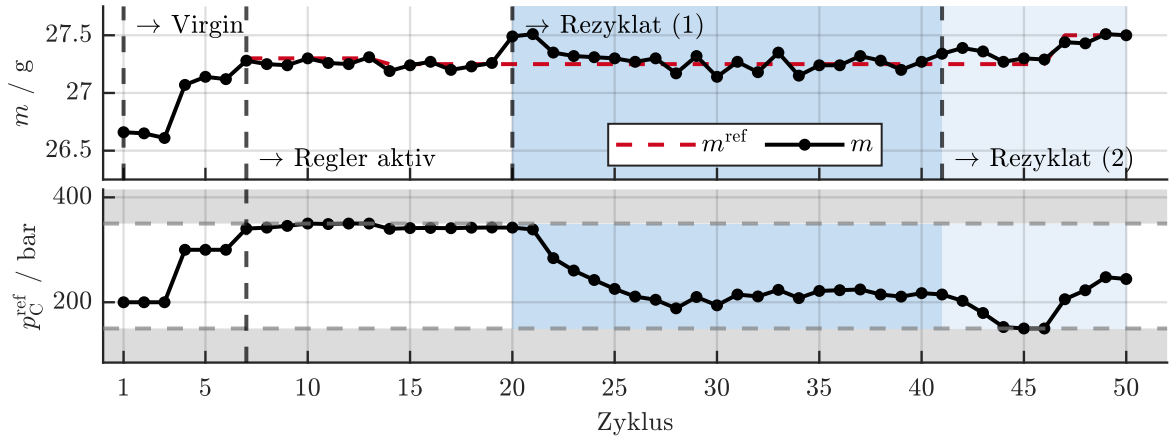


Abbildung 2: Adaptive modellbasierte Regelung der Bauteilmasse bei Materialwechseln ohne Prozessunterbrechung und ohne a priori Kenntnis der Materialeigenschaften oder der Bauteilgeometrie.

Literatur

[1] European Commission, The European Green Deal, European Commission, Brussels, Belgium, 2019. https://commission.europa.eu/publications/communication-european-green-deal_en (accessed May 6, 2025).

[2] M. Vukovic, S. Stemmler, K. Hornberg, D. Abel, C. Hopmann, Adaptive model-based predictive control for cross-phase cavity pressure control in injection molding, J. Manuf. Process. 77 (2022) 730–742. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.030.

Physically Constrained Learning of Gaussian Process System Models from Input-Output Data

Jan-Hendrik Ewering
Institute of Mechatronic Systems
Leibniz Universität Hannover
ewering@imes.uni-hannover.de

Thomas Seel
Institute of Mechatronic Systems
Leibniz Universität Hannover
seel@imes.uni-hannover.de

Matthias A. Müller
Institute of Automatic Control
Leibniz Universität Hannover
mueller@irt.uni-hannover.de

Thomas B. Schön
Division of Systems and Control
Uppsala University
thomas.schon@uu.se

Keywords: Nonlinear system identification, state estimation, model learning, Gaussian processes, physics-informed machine learning

Learning system dynamics is a key approach for enabling high-performance model-based control methods and system insight despite limited prior model knowledge. While recent deep learning methods thrive with vast amounts of training data, their limitations become apparent in few-data settings. In particular, practical system identification problems, e. g., in automotive, robotic, or biomedical applications, pose significant challenges due to rare, noisy, and incomplete observations.

To provide *well-generalizing* and *data-efficient* learning-based models, recent physics-informed machine learning approaches incorporate non-restrictive prior knowledge [1]. A notable example is to incorporate energy conservation laws into machine learning models. In a nutshell, a learning-based model, e. g., a neural network [2] or a Gaussian Process (GP) [3], approximates the system's scalar Hamiltonian or Lagrangian function. By applying operations from general physics knowledge to the model, e. g., Euler-Lagrange equations, a physically constrained representation—obeying underlying energy conservation laws by construction—is obtained.

However, while these approaches in general work very well if the *entire* system state is measured, learning physically interpretable system dynamics becomes significantly harder in more realistic *input-output* data settings [4]. In this regard, almost all existing work relies on velocity or momentum measurements, which is a restrictive assumption in many applications.

In this talk, we set off from the continuous-time Lagrange-d'Alembert principle, which underlies the energy conservation laws, and illustrate two approaches to address learning energy-constrained models from input-output data (see Figure 1). Doing so, we focus on GPs that are often well-suited to represent dynamical systems in the face of rare data. Moreover, a GP's inherent uncertainty quantification can benefit practical applications, e. g., through stochastic control. This leads to novel probabilistic model formulations that—despite learning from sparse input-output data—yield energy-consistent predictions over long time horizons.

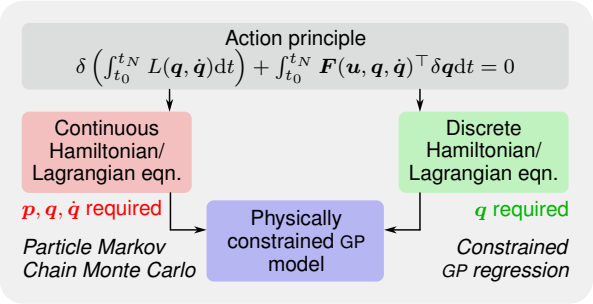


Figure 1: Overview of the considered energy-based modeling approaches.

In the first part of the talk, we build on a classical continuous-time Hamiltonian system formulation and show how a probabilistic energy-constrained GP model can be learned from input-output data [5]. To this end, we use Monte Carlo-based nonlinear system identification methods

that asymptotically sample from the true posterior distribution [6], [7]. Loosely speaking, the learning task is decomposed into a state-estimation and a parameter-learning subproblem.

The second part of the talk is dedicated to novel methods that take a different direction, where discrete-time Euler-Lagrange equations are used. This has the advantage of not requiring velocity or momentum measurements, which are often not available in practical applications. Instead, only position measurements are required to train the energy-constrained GP model.

We close the talk with illustrative examples in which physically constrained nonlinear system models with uncertainty quantification are learned solely from input-output data. We compare the methods to a state-of-the-art approach that relies on momentum measurements. Taking a step back, one can view the approaches from two angles. First, from a physics-informed learning perspective, we incorporate control principles to enable dynamics learning in more practical problem settings. On the other hand, the approaches can be interpreted as system identification schemes that ensure physical consistency in joint state and parameter estimation.

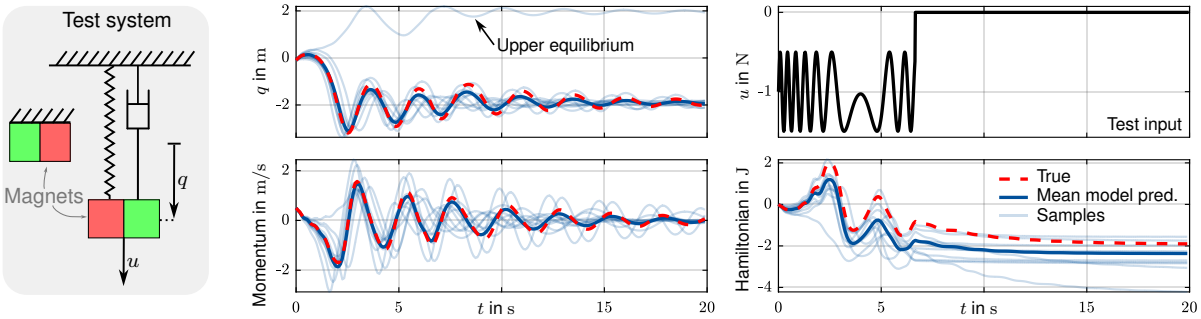


Figure 2: True system behavior and forward predictions of a learned Hamiltonian GP model. The probabilistic system representation is learned only from input-output data, and each sampled model yields a physically consistent prediction that resembles the actual system behavior.

Literature

[1] A. R. Geist and S. Trimpe, "Structured learning of rigid–body dynamics: A survey and unified view from a robotics perspective," *GAMM-Mitteilungen*, vol. 44, no. 2, 2021.

[2] M. Cranmer, S. Greydanus, S. Hoyer, P. Battaglia, D. Spergel, and S. Ho, "Lagrangian Neural Networks," in *ICLR Workshop on Integr. of Deep Neural Models and Diff. Eq.*, 2019.

[3] T. Beckers, J. Seidman, P. Perdikaris, and G. J. Pappas, "Gaussian Process Port-Hamiltonian Systems: Bayesian Learning with Physics Prior," in *61st Conference on Decision and Control (CDC)*, IEEE, 2022, pp. 1447–1453.

[4] M. D. Hansen, E. Celledoni, and B. K. Tapley, "Learning mechanical systems from real-world data using discrete forced Lagrangian dynamics," *preprint, arXiv: 2505.20370*, 2025.

[5] J.-H. Ewering, R. E. Herrmann, N. Wahlström, T. B. Schön, and T. Seel, "Learning Dynamics from Input-Output Data with Hamiltonian Gaussian Processes," *preprint, arXiv: 2511.05330*, 2025.

[6] B. Volkmann[1], J.-H. Ewering[1], M. Meindl, S. F. G. Ehlers, M. A. Müller, and T. Seel, "Bayesian Inference and Learning in Nonlinear Dynamical Systems: A Framework for Incorporating Explicit and Implicit Prior Knowledge," *preprint, arXiv: 2508.15345*, 2025.

[7] J.-H. Ewering, B. Volkmann, S. F. G. Ehlers, T. Seel, and M. Meindl, "Efficient Online Inference and Learning in Partially Known Nonlinear State-Space Models by Learning Expressive Degrees of Freedom Offline," in *63rd Conference on Decision and Control (CDC)*, IEEE, 2024, pp. 4157–4164.

[1] Equal contribution.

Developing Robust Data-Driven Models for Varying Environments

Qais Yousef

Fachgebiet Prozessoptimierung
Technische Universität Ilmenau
qais.yousef@tu-ilmenau.de

Pu Li

Fachgebiet Prozessoptimierung
Technische Universität Ilmenau
pu.li@tu-ilmenau.de

Keywords: Data-driven Model, Distributional Change, Prospect Certainty, Synaptic Plasticity, Adaptive Regularization, Deployment Robustness

Data-driven models, particularly artificial neural networks (ANNs), have achieved significant advances in recent years. However, their use in safety-critical applications remains limited due to the fact that data-driven models are highly sensitive to changes in the input data distributions. Such models are trained based on a source dataset usually assumed to be independent and identically distributed (i.i.d.). In contrast, real-world environments are marked by uncertainty, variability, and sudden distributional changes. Under these conditions, the predictive accuracy from the trained model declines, i.e., the model becomes essentially unreliable.

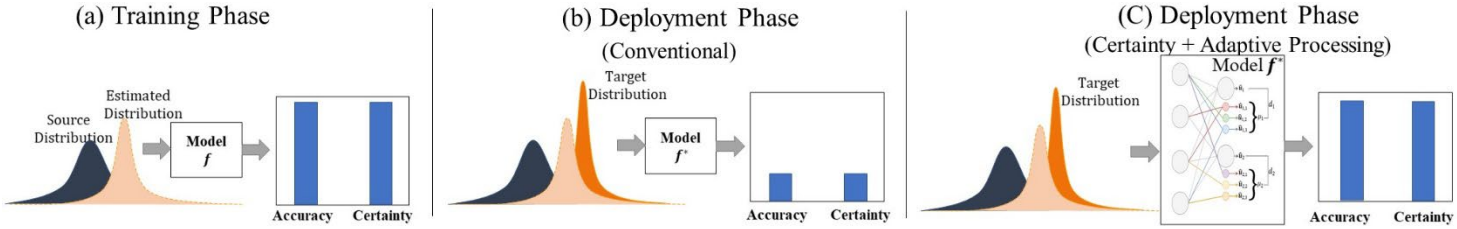


***Fig. 1**: Behaviors of a data-driven model in different phases. (a) Training phase with a known data distribution, where both accuracy and predictive certainty are high. (b) Behavior of the trained model in the deployment phase under changed input distribution, where the accuracy and certainty decrease significantly. (c) Improved behavior after enhancing the model with the prospect certainty quantification and synaptic plasticity-based regularization, whereby the accuracy and certainty are maintained at a high level comparable to the training phase.*

In this work, we introduce a framework that combines two complementary methods, prospect certainty [1] and synaptic plasticity [2], to address this challenge, as illustrated in Fig. 1. The prospect certainty provides a model-independent measure of predictive reliability during deployment. By generating and evaluating multiple masked variants of the output nodes, an explicit certainty score is derived that reliably identifies the model's certainty level without requiring labels or additional training data. The synaptic plasticity complements this diagnostic capability through adaptive rewiring of neural connections inside the ANN. This adaptation is formulated as a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) problem and solved by using a single-feed-forward (i.e., single-wave) scheme. Each modification to the neural connections is constrained by the prospect certainty to ensure that only the adjustments which increase or preserve the required reliability are implemented. During this process, a memory module is used to allow the reuse of previously optimized structures, thereby improving the efficiency under recurring conditions.

We carried out validations of the proposed framework both theoretically and empirically. Mathematical proofs establish the consistency of the prospect certainty function and confirm the convergence of the single-wave optimization scheme. In addition, numerical experiments with benchmark and real datasets were conducted, considering scenarios with in-distribution conditions, shifted out-of-distribution inputs, and uncertain environments. Our results show that the required certainty of the trained model can be maintained across varying environments. The discrepancy between training and deployment errors can be significantly reduced. In addition, the recurrent conditions are processed with low latency, thereby considerably reducing the model training time.

As a result, the proposed framework directly addresses the fragility of data-driven models to be deployed in changing environments by combining certainty quantification with bounded adaptation. The introduced prospect certainty and synaptic plasticity transform data-driven models into systems that remain dependable beyond the training domain. Therefore, the framework is particularly suitable for safety-critical applications. In autonomous driving, reliable perception must be maintained under dynamic traffic situations and changing environments. Another example is robotic surgery, where reliable decision-making is required despite patient-specific variability.

Literature:

[1] Q. Yousef, P. Li. „Prospect Certainty for Data-driven Models“. *Scientific Reports*, 15(2025), 8278.

[2] Q. Yousef, P. Li. „Synaptic Plasticity-based Regularization for Artificial Neural Networks“. *Scientific Reports*, 15(2025), 14330.

Online-Lernen von Teilsystemmodellen für Regelungstechnische Anwendungen

Ricus Husmann
Lehrstuhl für Mechatronik
Universität Rostock
ricus.husmann@uni-rostock.de

Sven Weishaupt
Lehrstuhl für Mechatronik
Universität Rostock
sven.weishaupt@uni-rostock.de

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

Schlüsselwörter: Lernende Regler, Gauß-Prozesse

Viele technische Systeme weisen einzelne Teilsysteme auf, die nur schwer zu modellieren sind, wohingegen sich die Modellierung anderer Teilsysteme einfach darstellt. Die Schwierigkeit bei der Modellierung kann durch eine inhärente Komplexität begründet sein oder schlichtweg durch fehlendes Wissen. Als Beispiel können hier Mehrkörpersysteme dienen, bei denen eine genaue Abbildung von Reibeffekten oder Kontaktkräften oft schwierig ist. Bei thermischen Systemen sind oft Energiebilanzen leicht aufzustellen, während Wärmeübergangskoeffizienten nur ungenau bekannt sind und sich nur in Sonderfällen theoretisch bestimmen lassen. Wie in Abbildung 1 motiviert, stellen wir einen Algorithmus vor, bei dem wir das vorhandene Modellwissen in Form von nichtlinearen Zustandsdifferenzengleichungen nutzen und das schwer zu modellierbare Teilsystem mit Hilfe von maschinellen Lernverfahren online lernen. Dieser Algorithmus wird als *Gaussian Process Submodel Online Learning* (GPSOL) bezeichnet.

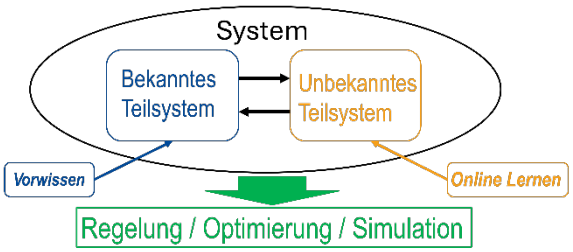


Abbildung 1: Motivation

Zu Beginn beschränken wir uns auf Systeme, die sich durch folgende Zustandsdifferenzengleichung beschreiben lassen:

$$\boldsymbol{x_{k+1}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x_k}, \boldsymbol{u_k}, z_k) + \boldsymbol{\nu_k}\ ,\ \ \boldsymbol{y}_k = h(\boldsymbol{x}_k) + \boldsymbol{\epsilon}_k \qquad (1)$$

mit Zuständen $\boldsymbol{x}_k \in \mathbb{R}^{n_x}$, Gaußschem Prozess-Rauschen $\boldsymbol{\nu}_k \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{0}, \boldsymbol{Q}_x)$, den verrauschten Messausgängen $\boldsymbol{y_k} \in \mathbb{R}^{n_y}$ mit Gaußschem Messrauschen $\boldsymbol{\epsilon_k} \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{0}, \boldsymbol{R})$ und den Stellgrößen $\boldsymbol{u}_k \in \mathbb{R}^{n_u}$. Die skalare latente Funktion, $z_k = z_f(\boldsymbol{\zeta_k})$, welche das schwer zu modellierende Teilsystem darstellt, ist von n_z deterministischen Größen $\boldsymbol{\zeta}_k = \left[\zeta_{k,1}, \zeta_{k,2}, \ldots, \zeta_{k,n_z}\right]^T$ abhängig.

Für die Online-Modellierung der unbekannten (*latenten*) Funktion existieren in der Literatur eine Reihe von Ansätzen. Eine klassische Möglichkeit ist die Nutzung von parametrischen Ansatzfunktionen, z.B. Polynomen, und die Identifikation der freien Parameter mittels *linearer Regression*, *Bayesian Linear Regression*, durch ein *Erweitertes Kalman Filter* (EKF) oder *Moving Horizon Estimation* (MHE). Diese Verfahren können, wenn der Funktionstyp der latenten Funktion bekannt ist, erfolgreich eingesetzt werden. Eine Generalisierung ist zudem in der Nutzung künstlicher neuronaler Netze zu finden.

Die Regression mittels Gauß-Prozessen (GP) weist als maschinelles Lernverfahren eine Reihe von Vorteilen auf. Hierzu zählen die hohe Dateneffizienz und die inhärente Quantifikation von Unsicherheiten. Als nicht-parametrisches Verfahren sind GPs aber nur bedingt für das Online-Lernen geeignet, da sie eine sehr ungünstige Datenkomplexität aufweisen. Es gibt jedoch eine Reihe von GP-Variationen, welche darauf abzielen, die Rechenzeit von der Menge an genutzten Daten zu entkoppeln. Unser Algorithmus baut auf der *Recursive Gaussian Process Regression* (RGP) auf, die GPs als parametrische Funktionen nutzt, dabei aber eine Reihe von nützlichen GP-Eigenschaften beibehält.

Der GPSOL-Algorithmus (in [1] noch mit RGP-dKF abgekürzt) besteht im Kern aus der nahtlosen Integration des RGP-Algorithmus in ein EKF. Er erlaubt das Lernen von latenten Funktionen als Teil von Systemen vom Typ (1). Neben der Herleitung des Algorithmus und einer simulativen Validierung wird in [1] eine experimentelle Validierung vorgestellt. Hierbei wird GPSOL erfolgreich auf einer Echtzeit-Hardware eingesetzt, um eine Funktion für die Wärmeübergangskoeffizienten einer Kompressionskältemaschine online zu lernen. Diese Funktion wird dann in der Regelung genutzt. In [2] stellen wir vor, wie Monotonie-Informationen in Bezug auf die latente Funktion genutzt werden können. Hierfür leiten wir eine Erweiterung des RGP-Algorithmus her, welche (ebenfalls online) unter Nutzung von Pseudo-Messungen rekursiv die Monotonie-Eigenschaften des GP-Models erzwingt. Dieser Algorithmus wird ebenfalls simulativ und experimentell validiert. Eine Kombination mit dem GPSOL-Algorithmus ist möglich und wurde erfolgreich an einem pneumatischen Prüfstand getestet.

Unsere aktuelle Forschung zu dem Thema beschäftigt sich mit der Aufweichung einiger Bedingungen an die Systemstruktur von (1) sowie die Erhaltung von Stabilitätseigenschaften, wenn die gelernten Teilsystemmodelle online in einer Regelung genutzt werden. Zudem ist die experimentelle Validierung an einer weiteren Systemklasse ein Ziel unserer Forschung.

Literatur

[1] Husmann, R., Weishaupt, S., and Aschemann, H.: Direct Integration of Recursive Gaussian Process Regression Into Extended Kalman Filters With Application to Vapor Compression Cycle Control. *IFAC-PapersOnLine*, 59(19), 514–519. In: *13th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems NOLCOS,* 2025.

[2] Husmann, R., Weishaupt, S., and Aschemann, H.: Recursive Gaussian Process Regression with Integrated Monotonicity Assumptions for Control Applications. In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics - Volume 1: ICINCO*, 2025.

Hybride dynamische Kausalanalyse industrieller Alarmfluten auf Basis von Daten und Prozesswissen

Gianluca Manca Alexander Fay

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik
Ruhr-Universität Bochum
{gianluca.manca, alexander.fay}@rub.de

Schlüsselwörter: Alarmflut, Ursachenanalyse, dynamische Kausalität, Regression

Alarmfluten entstehen, wenn in kurzer Zeit eine große Anzahl von Alarmen in der Leitwarte aktiviert wird [1,2]. In propagierenden abnormalen Situationen (Störungsfortpflanzung über Stoff-, Energie- und Informationspfade) können dabei viele Alarme nahezu gleichzeitig auftreten [3,4]. Dies erschwert die Situationsbeurteilung, erhöht die kognitive Last und kann dazu führen, dass die eigentlich ursächliche Störung spät oder falsch identifiziert und adressiert wird. Klassische Alarm-Management-Ansätze liefern im Ereignisfall häufig nur begrenzte Unterstützung bei der Frage, welche Alarme ursächlich, welche nur Folgeeffekte und welche aktuell entscheidungsrelevant sind [5].

Die Forschung zur Ursachenanalyse in Alarmfluten adressiert diese Fragestellung mit relevanten Verfahren, weist aber weiterhin systematische Einschränkungen auf. Die Übersichtsarbeit in [6] unterscheidet insbesondere wissensbasierte und datenbasierte Ansätze: Wissensbasierte Verfahren nutzen Prozessinformationen und Expert:innenwissen zur Modellierung von Fortpflanzungspfaden, sind jedoch in großen, komplexen Anlagen oft mit hohem Modellierungsaufwand verbunden und hängen von nicht immer verfügbarer Expertise ab. Datenbasierte Verfahren umfassen Zeitreihen-Kausalitätsanalyse (z. B. Granger, Transfer Entropie), probabilistische grafische Modelle (z. B. Bayes-Netze) sowie Machine Learning (ML)-basierte Strategien, sind aber sensitiv gegenüber Datenqualität, Rauschen und Modellannahmen und benötigen für den industriellen Einsatz insbesondere eine recheneffiziente, echtzeitfähige Umsetzung bei gleichzeitig geringem zusätzlichen Humanaufwand [5-7].

Der Vortrag adressiert diese Defizite mit einer durchgängigen, datengetriebenen Methodik zur dynamischen Kausalanalyse von Alarmfluten, die sowohl auf historischen Daten [7] als auch im laufenden Betrieb [8] eingesetzt werden kann. Grundlage sind historische bzw. online verfügbare Alarmprotokolle (Aktivierungen und Deaktivierungen von Alarmen) sowie kontinuierliche Prozessmessgrößen (Prozessvariablen). Die Methodik kombiniert (i) einen nichtlinearen, prädiktionsbasierten Kausalitätsschätzer auf Basis nichtparametrischer multiplikativer Regression mit (ii) einer Sliding-Window-Schätzung, um zeitvariable Kausalstrukturen in eskalierenden Situationen explizit abzubilden, und (iii) zusätzlichem Prozesswissen, insbesondere Konnektivität aus Engineering-Dokumenten (z. B. R&I-Fließbildern), um physikalisch bzw. funktional plausible Prozessvariablen-Verknüpfungen zu prüfen und Scheinzusammenhänge früh auszuschließen.

Konkret werden dynamische, gerichtete Kausalitätsstärken (X→Y) fensterweise geschätzt, indem geprüft wird, ob die Nutzung vergangener Werte von (X) und (Y) die Vorhersage von (Y) gegenüber einem Modell nur mit (Y) verbessert. Das erlaubt die Analyse nichtstationärer und nichtlinearer Zeitreihen, in denen sich Kausalitäten über die Zeit verändern können (z. B. durch Ausbreitung der Störung, Eingriffe des Operators oder die Reaktion des Prozessleitsystems). Die resultierenden bivariaten Kausalitätszeitreihen werden weiter verarbeitet (u. a. bidirektionaler Vergleich), um

kausal dominante Prozessvariablen und stark beeinflusste Prozessvariablen zu identifizieren; in Kombination mit den tatsächlich aktiven Alarmen lässt sich daraus eine Priorisierung kausal kritischer Alarme sowie plausibler Ursachen-Hypothesen ableiten [7].

Ein integraler Bestandteil der Methodik ist die für den Anlagenfahrer geeignete Darstellung der Ergebnisse [8]: Neben Zeittrend-Ansichten relevanter Prozessvariablen werden Kausalwirkungen kompakt aggregiert und als Tornado-Diagramm (inkl. Streuungs-/Min-Max-Information über ein Zeitfenster) visualisiert. Dadurch wird sichtbar, welche Größen in einem Zeitfenster kausal relevant sind und wie sich dieses Bild bei Regimewechseln der Situation verändert. Diese anlagenfahrerzentrierte Visualisierung ist explizit darauf ausgelegt, dynamische Kausalabhängigkeiten in sich entwickelnden Alarmfluten verständlich zu machen und dadurch die Diagnose zu unterstützen.

Die Wirksamkeit wird anhand öffentlich zugänglicher Daten auf Basis des Tennessee-Eastman-Prozesses illustriert. In typischen Szenarien führt eine Störung (z. B. eine sprungförmige Änderung der Materialzufuhr) zu einer Alarmflut und kann, wenn sie unbehandelt bleibt, bis zu sicherheitskritischen Zuständen (z. B. hohem Reaktordruck und Notabschaltung) eskalieren. Die dynamische Kausalanalyse zeigt dabei, dass dominante Einflussgrößen und Wirkpfade über die Zeit wechseln können, was in statischen Kausalgraphen verborgen bleibt.

Abschließend werden offene Punkte und Weiterentwicklungsmöglichkeiten diskutiert: robuste und automatisierte Parametrierung, Unsicherheitsquantifizierung der Kausalaussagen sowie die Generalisierbarkeit über unterschiedliche Prozesstypen hinweg.

Literatur

[1] ANSI/ISA 18.2:2016. Management of Alarm Systems for the Process Industries, 2nd ed., 2016.

[2] EEMUA. Alarm Systems, Publication 191, London, 2024.

[3] J. Wang, W. Hu, T. Chen, “Intelligent Industrial Alarm Systems: Advanced Analysis and Design Methods.” Springer Singapore, 2024, doi: 10.1007/978-981-97-6516-4.

[4] G. Manca, A. Fay: “Detection of Historical Alarm Subsequences Using Alarm Events and a Coactivation Constraint.” IEEE Access, vol. 9, 2021, pp. 46851–46873, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3067837.

[5] G. Manca: Daten-getriebene Methoden zur Analyse von Alarmfluten in automatisierten industriellen Prozessen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2025.

[6] H. S. Alinezhad, M. H. Roohi, T. Chen: “A review of alarm root cause analysis in process industries: Common methods, recent research status and challenges.” Chemical Engineering Research and Design, vol. 188, 2022, pp. 846–860, doi: 10.1016/j.cherd.2022.10.041.

[7] G. Manca, A. Fay: “Off-Line Analysis of Dynamic Causal Dependencies in Evolving Industrial Alarm Floods.” Proc. IEEE ICPS, 2022, pp. 1–8, doi: 10.1109/ICPS51978.2022.9816853.

[8] G. Manca, F. C. Kunze, E. Brorsson, A. Fay: “Dynamic Causal Analysis with Operator-Centric Visualization for Managing Industrial Alarm Floods.” Proc. IEEE ONCON, 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/ONCON60463.2023.10430533.

Erreichbarkeitskonforme Identifikation dynamischer Systeme

Laura Lützow
Lehrstuhl für Robotik, Künstliche Intelligenz und Echtzeitsysteme
Technische Universität München
laura.luetzow@tum.de

Matthias Althoff
Lehrstuhl für Robotik, Künstliche Intelligenz und Echtzeitsysteme
Technische Universität München
althoff@tum.de

Schlüsselwörter: Erreichbare Mengen, Systemidentifikation, Unsicherheitsquantifikation, Sicherheitsverifikation

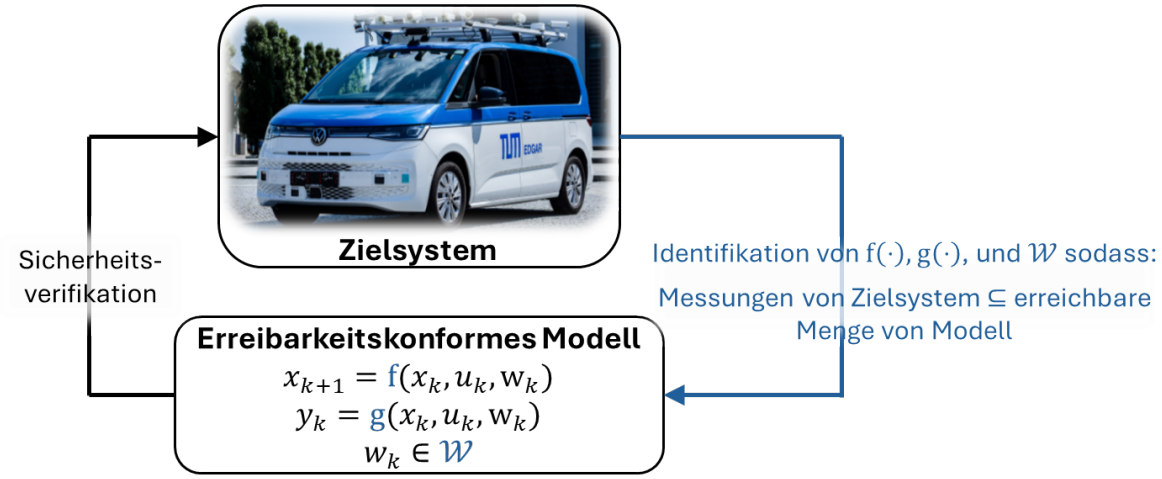


Abbildung 1: Schematische Darstellung der erreichbarkeitskonformen Identifikation.

Die Verifizierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme erfordert mathematische Modelle, die das Verhalten des Zielsystems möglichst präzise abbilden. Unvermeidliche Unsicherheiten, wie nicht modellierbare Dynamiken oder Störgrößen, führen jedoch zu Abweichungen zwischen Modellvorhersagen und dem tatsächlichen Systemverhalten. Diese Abweichungen beeinträchtigen sowohl die Zuverlässigkeit modellbasierter Regelungsverfahren als auch die Aussagekraft verifikationsbasierter Sicherheitsnachweise.

In diesem Vortrag wird ein mengenbasierter Ansatz zur Identifikation dynamischer Systeme vorgestellt, bei dem abstrakte, nichtdeterministische Modelle konstruiert werden, die alle beobachteten Ausgänge des Zielsystems reproduzieren können. Diese Form der Verhaltenseinschließung wird als Erreichbarkeitskonformität bezeichnet und erlaubt die Übertragung von Sicherheitseigenschaften vom Modell auf das reale System [1]: Alle Ausgänge, die für ein erreichbarkeitskonformes Modell unerreichbar sind, sind auch für das Zielsystem unerreichbar.

Bei der Identifikation erreichbarkeitskonformer Modelle aus endlichen Messdaten werden Unsicherheitsvariablen in die Modellstruktur eingefügt, die durch eine unbekannte Unsicherheitsmenge beschränkt werden [2,3]. Anschließend werden Modellstruktur und Unsicherheitsmenge gemeinsam optimiert, sodass alle Messdaten durch geeignete Auswahl von Unsicherheiten aus dieser Menge reproduzierbar sind, während gleichzeitig der Konservativismus des

resultierenden Modells minimiert wird. Obwohl Erreichbarkeitskonformität nur für die betrachteten Identifikationsdaten garantiert werden kann, lassen sich Generalisierungsgarantien für neue Messdaten probabilistisch quantifizieren und gezielt beeinflussen [2].

Die Methodik unterstützt unterschiedliche Grade an Vorwissen über das Zielsystem [3]: Bei fehlendem Vorwissen (Black-Box-Identifikation) kann der Ansatz als mengenbasierte Systemidentifikation interpretiert werden, während er bei gegebener Modellstruktur (White-Box-Identifikation) eine enge Verwandtschaft zur mengenbasierten Unsicherheitsquantifikation aufweist. Dabei werden Zusammenhänge und Vorteile gegenüber „Conformal Prediction“ beleuchtet, einer etablierten Methode zur Unsicherheitsquantifizierung im maschinellen Lernen [4].

Literatur

[1] H. Roehm, J. Oehlerking, M. Woehrle, and M. Althoff. “Model conformance for cyber-physical systems: A survey”. In: *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems.* 2019.

[2] L. Lützow and M. Althoff. „Scalable reachset-conformant identification of linear systems”. In: *IEEE Control Systems Letters.* 2024.

[3] L. Lützow and M. Althoff. „Reachset-Conformant System Identification“. In: *Transactions on Automatic Control*. 2026.

[4] L. Lützow, M. Eichelbeck, M. Kochenderfer und M. Althoff. “Zono-conformal prediction: Zonotope-based uncertainty quantification for regression and classification tasks”. In: *Journal of Machine Learning Research [accepted]*. 2026.

Vom Datenstrom zur Differentialgleichung: Parametrische Modellierung zeitabhängiger Systemzustände

Benedikt Stratmann[1,2]

Jürgen Beyerer[1,2]

[1]Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
benedikt.stratmann@iosb.fraunhofer.de

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

Schlüsselwörter: Datengetriebene Differentialgleichungsmodelle, Drift-Normalisierung, Continuous Normalizing Flows

Viele technischen Systeme arbeiten in Umgebungen, deren Eigenschaften sich im Betrieb verändern. Sensorik, Lastprofile, Umgebungsbedingungen oder Verschleiß führen dazu, dass die Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen nicht stationär ist. Um in diesen Umgebungen maschinelle Lernverfahren einsetzen zu können, müssen Verfahren der Konzeptdrift-Erkennung eingesetzt werden. Diese liefern aktuell binäre Signale („Veränderung ja/nein“) und lösen daraufhin ein Umparametrieren oder Neutrainieren eines Modells aus. Die zeitliche Entwicklung des Systems selbst – also wie sich der Systemzustand kontinuierlich verändert – wird dabei in der Regel nicht explizit modelliert.

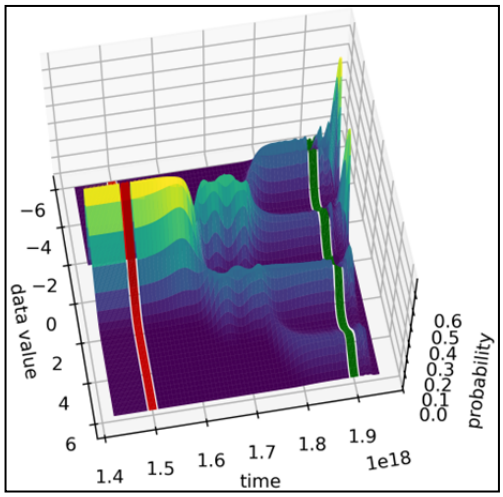


Abbildung 1: Entwicklung eines beispielhaften Systems, modelliert durch eine TWKDE. Startzustand (rot) und Zielzustand (grün).

Im Vortrag wird eine Methodik vorgestellt, mit der zeitveränderliche Systeme direkt aus Daten in parametrisierte Differentialgleichungen überführt werden. Statt ein physikalisches Modell vorzugeben, wird die beobachtete Systementwicklung auf Verteilungsebene als Fluss eines Wahrscheinlichkeitsmaßes auf dem Raum der Eingangs- und Ausgangsgrößen $\mathcal{X} \times \mathcal{Y}$ beschrieben.

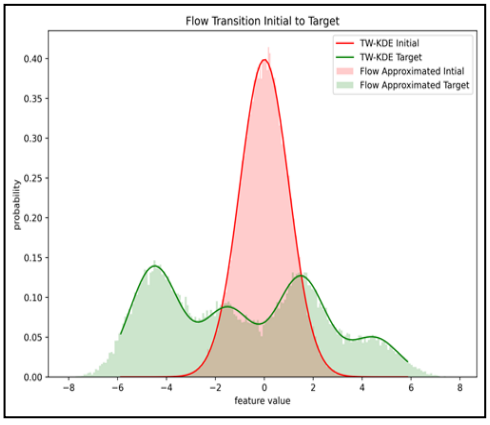


Abbildung 2: Resultate des gelernten Flusses für den Startzustand (rot) und den Zielzustand (grün)

Ausgangspunkt ist ein Zeitstempel-Strom (z_i, t_i) mit $z_i = (x_i, y_i)$, der ein unbekannt zeitvariantes System beschreibt. Für jeden Zeitpunkt t wird zunächst eine gemeinsame Dichte $\hat{p}_t(z)$ mittels Time-Weighted Kernel Density Estimation (TWKDE) [1] konstruiert. Diese liefert eine zeitparametrisierte Familie von Schnappschüssen $\{\hat{p}_t\}_{t \in I}$, die den Systemzustand für das Zeitinterval I approximieren, ohne eine feste Struktur für das zugrunde liegende Modell anzunehmen.

Im zweiten Schritt wird eine frei parametrisierte Differentialgleichung im Datenraum gelernt [2], deren Fluss $\Phi_{0\to t}$ eine die initiale Verteilung p_0 in die empirischen Zustände überführt:

$$\Phi_{0\to t}(p_0(\cdot)) = p_o(\cdot)e^{\int_0^t Tr\left(\frac{\partial f_\theta(z(t),t)}{\partial z(t)}\right)dt} \approx \hat{p}_t(\cdot).$$

Technisch wird f_θ als Neural-ODE [3] (Continuous Normalizing Flow) realisiert und mittels Maximum-Likelihood über die Zeitachse hin so bestimmt, dass die erzeugten Trajektorien die beobachtete Verteilungsdynamik reproduzieren. Damit liegt eine explizite, invertierbare Transportabbildung vor, die die zeitabhängige Systemveränderung kompakt parametrisiert.

Diese Darstellung erlaubt es, zeitveränderliche Systeme auf mehreren Ebenen auszuwerten:

- Vorwärts- und Rückwärtspropagation von Zuständen und Dichten zwischen beliebigen Zeitpunkten
- Analyse der Systementwicklung als Trajektorie im Maßraum (z. B. von uni- zu multimodalen Verteilungen)
- Nutzung des Transportoperators zur Normalisierung von Systemänderungen, etwa indem Daten oder bestehende Prädiktoren konsistent zwischen verschiedenen Zeitschnitten abgebildet werden

Literatur

[1] Andrew Harvey and Vitaliy Oryshchenko. “Kernel density estimation for time series data”. In: International Journal of Forecasting - INT J FORECASTING 28 (Mar. 2012). doi:10.1016/j.ijforecast.2011.02.016.

[2] Will Grathwohl et al. FFJORD: Free-form Continuous Dynamics for Scalable Reversible Generative Models. 2018. arXiv: 1810.01367 [cs.LG]. url: https://arxiv.org/abs/1810.01367.

[3] Ricky T. Q. Chen et al. “Neural Ordinary Differential Equations”. In: Advances in Neural Information Processing Systems. Ed. by S. Bengio et al. Vol. 31. Curran Associates, Inc., 2018. url: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2018/file/69386f6bb1dfed68692a24c8686939b9-Paper.pdf.

Zustandsüberwachung und -regelung von Sprühtrocknungsprozessen

Arthur Lepsien

Fachgebiet Prozessanalytik
Universität Hohenheim
arthur.lepsien@uni-hohenheim.de

Alexander Schaum

Fachgebiet Prozessanalytik
Universität Hohenheim
alexander.schaum@uni-hohenheim.de

Schlüsselwörter: Sprühtrocknung, DMD, FEM, Beobachterentwurf, unbekannte Eingänge

Sprühtrocknung ist einer der grundlegenden Prozesse in der verfahrenstechnischen Herstellung von Pulvern aus Flüssigkeiten. Daher stellt sie einen wesentlichen Bestandteil vieler Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse in der Verfahrenstechnik und insbesondere der Lebensmittel- und Pharmaindustrie dar. Hierbei ist für die Produktqualität das korrekte Zusammenspiel verschiedener komplexer Mechanismen relevant, was die Prozesssteuerung und -regelung herausfordernd macht. Modelle, welche diese Mechanismen hinreichend gut abbilden können sind für das Verständnis und die Auslegung der Prozesse hilfreich und essenziell.

Die grundlegenden Komponenten von Sprühtrocknern sind in Abb. 1 dargestellt. Das Verfahren 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 heißem Gas (typischerweise Luft) innerhalb 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 mindestens einem Tröpfchen gebildet. Es kann auch zu Agglomeraten und Bruchphänomenen kommen.

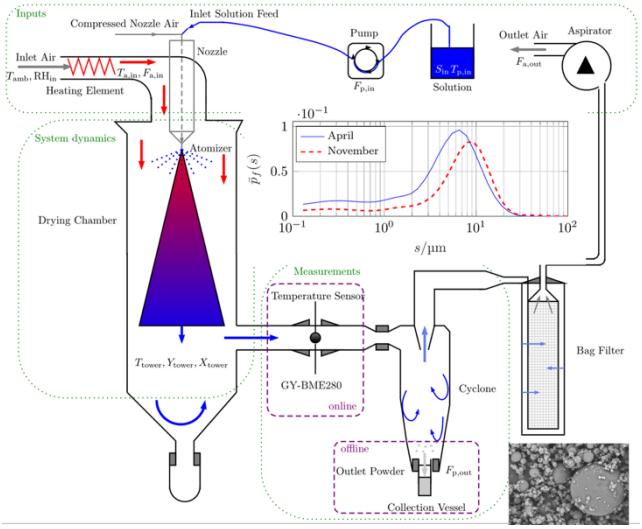


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Sprühtrocknungsprozesses.

Zur Beschreibung werden oft Multiphysics FEM Modelle verwendet, die in der Regel aufgrund der Komplexität der Einzelvorgänge und ihres Zusammenspiels rechenaufwendig und daher nicht in Echtzeit, d.h. parallel zu einem laufenden Prozess zur Prädiktion und Analyse verwendet werden können. Aus Sicht der Regelungstechnik kann es in vielen Fällen jedoch ausreichend sein, wesentliche Sensitivitäten bezüglich Stellgrößen im Prozess hinreichend gut abzubilden, um ein gewünschtes Prozessverhalten zu ermöglichen. Dies ist oftmals mit einfacheren Modellen, d.h. mit geringem Rechenaufwand möglich. Neben klassischer Massen- und Energiebilanzierung [1-3] eignen sich hierfür auch moderne Methoden wie die Dynamic Mode

Decomposition (DMD) [4-6], welche eine systematisch-strukturierte datenbasierte Modellierung ermöglichen.

In dem Beitrag wird zum einen aufgezeigt, wie auf der Basis solcher Modelle Methoden zur Zustandsüberwachung entwickelt werden können. Auf Basis eines verteilt-parametrischen Modells wird die Modellordnungsreduktion und die optimale Sensorpositionierung diskutiert [4,6]. Mittels eines endlich-dimensionalen Modelles, werden Beobachter entwickelt, die auf der Fusion von Messdaten mit einer Modellsimulation basieren [7,8]. Weiterhin wird beispielhaft dargestellt, wie diese Modelle für die Regelung des Prozesses verwendet werden können, z.B. mittels Ansätze der modellprädiktiven Regelung (MPC) [9,10]. Weiterhin wird das Problem der Zustandsschätzung durch den Entwurf eines Beobachters mit unbekanntem Eingang gelöst, wobei die Verdunstungsrate als unbekannter zeitabhängiger begrenzter Quellterm betrachtet wird [8], welcher dann mittels Sliding-Mode Differenzierern geschätzt werden kann.

Literatur

[1] L. N. Petersen, et al. "An experimentally validated simulation model for a four-stage spray dryer." Journal of Process Control 57 (2017): 50-65.

[2] A. Lepsien, und A. Schaum. "Thermodynamic model identification for a one-stage spray dryer." IFAC-PapersOnLine 58.14 (2024): 228-234.

[3] A. Lepsien, et al. "Control oriented modeling for particle size distributions in a spray drying process." IFAC-PapersOnLine 58.15 (2024): 438-443.

[4] A. Lepsien, A. Schaum. (2025). Reduced order modeling for spray drying. IFAC 11th Vienna International Conference on Mathematical Modelling (2025), accepted.

[5] J. L. Proctor und S. L. Brunton und J. N. Kutz. "Dynamic mode decomposition with control." SIAM Journal on Applied Dynamical Systems 15.1 (2016): 142-161.

[6] A. Lepsien und A. Schaum. "Modellordnungsreduktion für die Zustandsschätzung am Beispiel eines Sprühtrocknungsprozesses." at-Automatisierungstechnik 73.8 (2025): 558-571.

[7] R. Dürr, et al. "Inferential control of product properties for fluidized bed spray granulation layering." IFAC-PapersOnLine 53.2 (2020): 11410-11415.

[8] A. Lepsien und H. Hernández-Escoto und A. Schaum. "Evaporation rate independent state estimation for a spray drying process." IFAC-PapersOnLine 59.6 (2025): 415-420.

[9] L. N. Petersen, et al. "Comparison of three control strategies for optimization of spray dryer operation." Journal of Process Control 57 (2017): 1-14.

[10] A. Lepsien und A. Schaum. "Trajectory planning and tracking control for a one-stage spray dryer." IFAC-PapersOnLine 58.14 (2024): 354-359.

System Identification of Physics-Informed Control-Oriented Spatio-Temporal Temperature Models for Laser Beam Direct Energy Deposition

Massimiliano Pandolfo
Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik
Universität Kassel
massimiliano.pandolfo@mrt.uni-kassel.de

Andreas Kroll
Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik
Universität Kassel
andreas.kroll@mrt.uni-kassel.de

Schlüsselwörter: System Identification, Distributed Parameter System, Additive Manufacturing

Quality assurance is a key challenge in the additive manufacturing of metal. Evidence shows that the final material properties depend on the cooling rate and temperature history of the part during the production process [1]. For this reason, over the last decade various efforts have been targeted at developing real-time-capable, control-oriented thermal models.

These endeavours are faced with a wide range of challenges. The actual process features highly complex multi-physics phenomena, which typically require high-fidelity finite element modelling to achive an accurate representation: the computational cost of such approaches makes them unsuitable for closed-loop control. In this context, scientific machine learning (SciML) offers a highly promising alternative to build surrogate models, but traditional physics-informed neural networks struggle to model behaviour outside of the training scenarios, and more importantly are not designed to model the relationship between the output (temperature field) and a control input.

While lower fidelity models – i.e. models that simplify or ignore some of the more complex physics – can suffice for control applications, the spatial dependency of heat diffusion presents an obstacle to typical lumped-parameter modelling. Many such models focus on locally controlling temperature or cooling rate, but they are limited in their ability to guarantee uniformity across the whole component [2,3].

Conversely, spatio-temperal models of the temperature allow to grasp the full-field thermal behaviour, thereby allowing greater control over the final part quality. Previous investigation showed the promise of this approach, whilst highlighting the limitations of modelling the heat diffusion using a linear in the parameter (LiP) system [4].

Here, two approaches to model the temperature field on the workpiece surface are presented. In both cases, the resulting grey-box model embeds a difference equation derived from the bidimensional heat transfer partial differential equation. Both models are identified and validated using high-dynamic range (HDR) infrared camera measurements from powder-based laser beam direct energy deposition (DED-LB/M) of AISI 316 L on a S235 steel substrate. Prior to the system identification, the thermal data undergoes a dedicated sequence of pre-processing steps including rectification, melt-pool and track segmentation and spatial discretization.

The first study features a linear-parameter-varying (LPV) model, which is leveraged to encompass the different properties of workpiece and substrate for geometries consisting of a single horizontal layer deposited on the substrate [5].

The second study proposes an alternative approach to the definition of the spatial domain, accounting for the growing geometry typical of additive manufacturing processes. While modelling vertical walls the need for a higher temperature fidelity emerged: the governing equation was thus augmented with a radiative-loss term, and an explicit emissivity-correction procedure was developed and integrated in the aforementioned data pre-processing strategy [6].

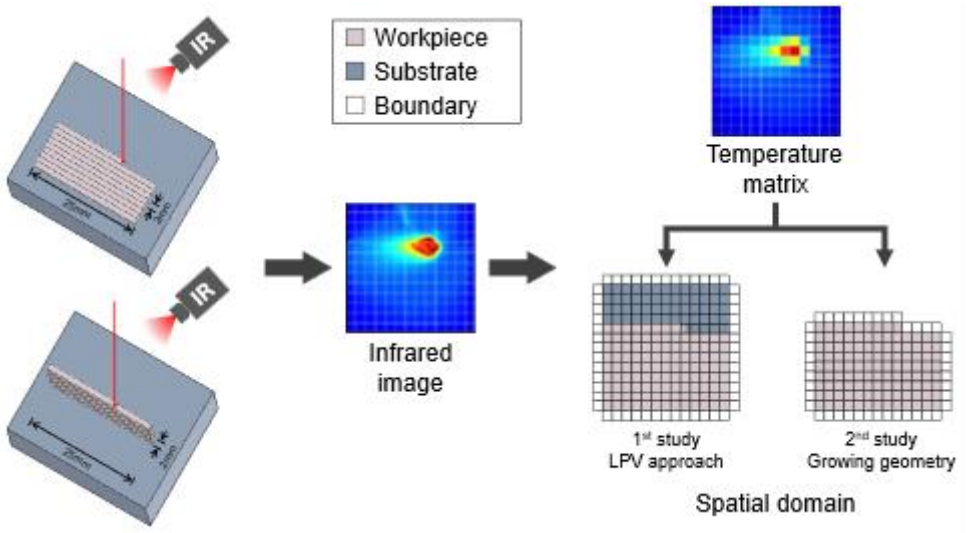


Figure 1:Schematic showing the geometries, process and modelling approaches

Literatur

[1] N. Shamsaei, A. Yadollahi, L. Bian, and S. M. Thompson, “An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control”, Additive Manufacturing, vol. 8, pp. 12–35, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.addma.2015.07.002

[2] M. H. Farshidianfar, F. Khodabakhshi, A. Khajepour, and A. P. Gerlich, “Closed-loop control of microstructure and mechanical properties in additive manufacturing by directed energy deposition”, Materials Science and Engineering: A, vol. 803, p. 140483, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.msea.2020.140483.

[3] Sammons, P.M., Bristow, D.A. and Landers, R.G. (2019) “Two-Dimensional Modeling and System Identification of the Laser Metal Deposition Process”, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 141(2), p. 021012. Available at: https://doi.org/10.1115/1.4041444.

[4] Kahl, M. et al. (2021) “Identification of a Spatio-Temporal Temperature Model for Laser Metal Deposition”, Metals, 11(12), p. 2050. Available at: https://doi.org/10.3390/met11122050.

[5] G. da F. Pereira, G. Jeličić, and A. Kroll, “Spatio-temporal LPV model of 2D workpiece temperature for Direct Laser Deposition”, IFAC-PapersOnLine, vol. 56, no. 2, pp. 6606–6611, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ifacol.2023.10.359.

[6] G. da F. Pereira, G. Jeličić, and A. Kroll, “Spatio-temporal temperature models for growing 2D workpieces during DLD with emissivity compensation for thermal imaging”, in 2024 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), Aug. 2024, pp. 310–315. doi: 10.1109/CCTA60707.2024.10666539.

Regelung eines Hardware-in-the-Loop-Teststands für Herzassistenzpumpen

Marko Grujic

Christian Doppler Labor für mechanische Kreislaufunterstützung, Universitätsklinik für Herz- und thorakale Aortenchirurgie
Medizinische Universität Wien
marko.grujic@meduniwien.ac.at

Marcus Granegger

Christian Doppler Labor für mechanische Kreislaufunterstützung, Universitätsklinik für Herz- und thorakale Aortenchirurgie
Medizinische Universität Wien
marcus.granegger@meduniwien.ac.at

Stefan Jakubek

Institut für Mechanik und Mechatronik

Technische Universität Wien
stefan.jakubek@tuwien.ac.at

Philipp Eichmeir

Fakultät für Technik und Angewandte Naturwissenschaften
University of Applied Sciences Upper Austria
philipp.eichmeir@fh-wels.at

Schlüsselwörter: Herzpumpe, Pumpenregelung, Hardware-in-the-loop, Feedbacklinearisierung, adjungierte Gradientenmethode

Mechanische Herzunterstützungssysteme (Ventricular Assist Devices, VADs, vgl. Abb. 1) haben die Therapie der terminalen Herzinsuffizienz grundlegend verändert. Moderne Blutpumpen erreichen heute Überlebensraten, die mit jenen nach Herztransplantation vergleichbar sind, und eröffnen darüber hinaus eine besonders attraktive Perspektive: die funktionelle Erholung des nativen Herzens mit der Möglichkeit einer späteren Explantation der Pumpe. Dieses Potenzial wird derzeit jedoch nur unzureichend ausgeschöpft, da klinisch eingesetzte VADs meist mit konstanter Drehzahl betrieben werden und somit nicht aktiv auf den individuellen Zustand des Patienten reagieren.

Die Entwicklung und experimentelle Absicherung entsprechender Regelungs- und Optimierungskonzepte erfordert eine Versuchsplattform, die sowohl die sicherheitskritischen Eigenschaften realer Blutpumpen berücksichtigt als auch eine reproduzierbare, kontrollierte und patientenspezifische Variation physiologischer Randbedingungen erlaubt. Diese Arbeit befasst sich mit der Regelung eines entsprechenden Hardware-in-the-Loop-Teststands, vgl. [1]. Der Teststand emuliert die hochdynamische Interaktion zwischen einer realen Pumpe und einem simulierten menschlichen kardiovaskulären System in einem sogenannten Hybrid-Mock-Circulatory Loop (H-MCL, vgl. Abb. 2). Das kardiovaskuläre Modell wird in Echtzeit berechnet und stellt Referenztrajektorien für die Drücke im Herzen und in der Aorta bereit. Der gemessene Pumpenfluss wird als Eingang in das Patientenmodell zurückgeführt, sodass ein geschlossener Regelkreis entsteht. Die Entkopplung der nichtlinearen Druckdynamik erfolgt mittels Feedback-Linearisierung und wird durch eine Regelung der Füllstandshöhen der Reservoirs ergänzt. Der vorgestellte Aufbau vermeidet durch den Einsatz eines Quetschventils zusätzliche Blutschädigung durch die Hardware (vgl. Abb. 2) und erlaubt somit auch die Untersuchung der Blutkompatibilität der Pumpe. Bei gleichen Reservoirdrücken – einem klinisch relevanten Szenario – verliert das Quetschventil jedoch seine Wirksamkeit, wodurch die Kopplungsmatrix singulär wird. Dieses Problem wird durch einen Optimierungsansatz adressiert, der die Füllstände unter minimaler Aktuatorbetätigung sicher innerhalb der Randbedingungen führt. Die entwickelten Regelungs- und Optimierungskonzepte haben sich im Dauerbetrieb bewährt und bilden eine belastbare Grundlage für weiterführende Forschung, [2, 3].

Darüber hinaus wird im Vortrag ein erster Ansatz für eine patientenspezifische Regelung der Pumpendrehzahl zur Förderung der Herzerholung vorgestellt. Als Zielgröße dient die maximale Herzeffizienz, definiert über die ventrikulo-arterielle Kopplung (VAK) als Verhältnis der arteriellen zur ventrikulären Elastanz. Die Pumpendrehzahl wird dabei über einen Herzzyklus

so optimiert, dass die VAK der eines gesunden Herzens entspricht und das Herz dadurch optimal entlastet wird. Methodisch kommt hiefür die adjungierte Gradientenmethode zum Einsatz [4].

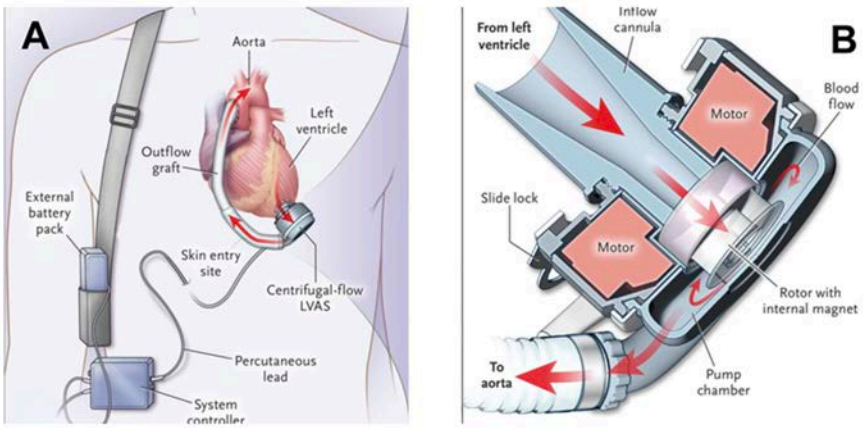


Abbildung 1: Herzassistenzpumpe, (LVAD - Left Ventricular Assist Device)

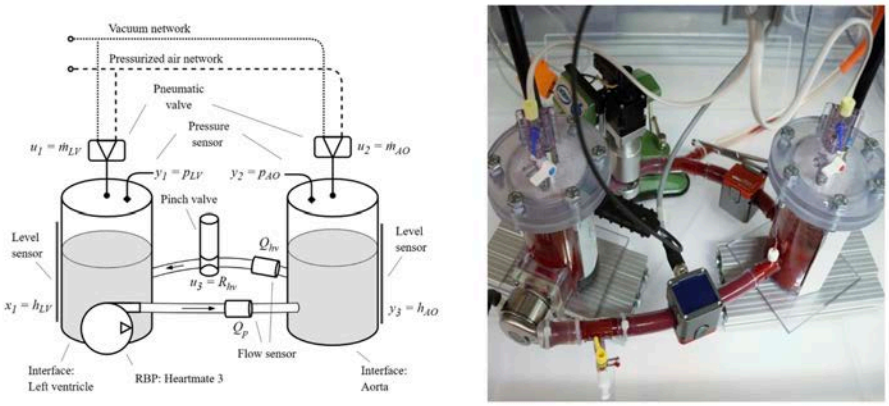


Abbildung 2: Hochdynamischer Hardware-in-the-Loop Teststand für Herzassistenzpumpen

Literatur

[1] Bender, Moritz, Andreas Escher, Barbara Messner, Michael Röhrich, Michael Bernhard Fischer, Christoph Hametner, Günther Laufer et al. "An atraumatic mock loop for realistic hemocompatibility assessment of blood pumps." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 71, no. 5 (2023): 1651-1662.

[2] He, Xiangyu, Krishnaraj Narayanaswamy, Michael B. Fischer, Leonie Schmitt, Teresa Ruthmeier, Barbara Messner, Stefan Jakubek, Daniel Zimpfer, and Marcus Granegger. "In-vitro Hemocompatibility Evaluation of the HeartMate 3 under Realistic Operating Conditions." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* (2025).

[3] Abart, Theodor, Marko Grujic, Philipp Aigner, Michael Röhrich, Stefan Jakubek, Daniel Zimpfer, and Marcus Granegger. "Accuracy of the HeartMate 3 Left Ventricular Assist Device Flow Estimation." *Scientific Reports* 15, no. 1 (2025): 18971.

[4] S. Reichl und W. Steiner. „The Optimal Control Approach to Dynamical Inverse Problems." *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2012.

Sensormodalitätsübergreifendes Vortraining für die Radar-Objekterkennung

Patrick Palmer

Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik
Technische Universität Dortmund
patrick.palmer@tu-dortmund.de

Torsten Bertram

Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik
Technische Universität Dortmund
torsten.bertram@tu-dortmund.de

Schlüsselwörter: 4D Radar, 3D-Objekterkennung, Maschinelles Lernen,

Die Umgebungswahrnehmung bildet das erste Modul der Informationsprozesskette in jedem automatisierten Fahrsystem. Die Erkennung dynamischer Objekte ist dabei von zentraler Bedeutung, da sie die Grundlage für mögliche Interaktionen mit dem Ego-Fahrzeug bildet. Dabei kommen unterschiedliche Sensormodalitäten wie Lidar, Kamera und Radar zum Einsatz. Aktuell werden vor allem Lidar- und Kamerasensoren verwendet, da sie eine hochauflösende Repräsentation der Fahrzeugumgebung liefern. Lidar-Sensoren sind jedoch mit hohen Kosten verbunden, während Kameras zwar kostengünstiger, aber bei ungünstigen Lichtverhältnissen, wie Dunkelheit oder tief stehender Sonne eingeschränkt sind. Zudem sind beide Sensortypen bei widrigen Wetterbedingungen wie Regen oder Nebel beeinträchtigt, was sich in einer reduzierten Sichtweite und einem erhöhten Messrauschen äußert.

Aktuell gewinnen Radarsensoren durch die Entwicklung hochauflösender 4D-Radarsysteme an Bedeutung in der Objekterkennung. Im Gegensatz zu klassischen 3D-Radarsensoren können diese den Elevationswinkel messen und verfügen über eine deutlich höhere Auflösung. Dies, sowie die ähnliche Datenrepräsentation als Punktwolke, ermöglicht die Nutzung von lernbasierten 3D-Objekterkennungsverfahren, die ursprünglich für Lidar-Daten entwickelt wurden [1, 2]. Gleichzeitig behalten sie die Vorteile klassischer Radarsensoren, wie die Unabhängigkeit von Licht- und Wetterbedingungen, niedrige Kosten und die instantane Messung der relativen Radialgeschwindigkeit. Im Vergleich zu anderen Sensormodalitäten sind sie jedoch weiterhin in ihrer Auflösung, Messgenauigkeit und damit auch in ihrer Objekterkennungsleistung begrenzt.

Ein Ansatz, um die Limitierungen von Radarsensoren zu überwinden, besteht in der Kombination mit anderen Sensormodalitäten. Radardaten werden mit Lidardaten fusioniert, um die bereits hohe Leistungsfähigkeit des Lidars weiter zu steigern [3], oder mit Kameradaten kombiniert, um eine kostengünstige Alternative zum Lidar mit guter Erkennungsleistung zu ermöglichen [4]. Unter bestimmten Witterungseinflüssen können die zusätzlichen Sensormodalitäten jedoch keine zuverlässigen Messungen mehr liefern, sodass das System in diesen Fällen auf eine rein radarbasierte Umgebungswahrnehmung zurückgreifen muss.

In diesem Beitrag werden drei Ansätze vorgestellt, die informationsdichten Sensormodalitäten im Training von Radar-Objektdetektoren nutzen, um die Erkennungsleistung auf Radardaten zu steigern. Während der Inferenz kommt anschließend ausschließlich das Radar als Sensormodalität zum Einsatz.

Der erste Ansatz zielt darauf ab, die Auflösung der Punktwolke durch Akkumulation der Radarmessungen über mehrere Zeitschritte zu erhöhen. Dies wird in den meisten Arbeiten zur Objekterkennung verwendet. Allerdings wird die Punktwolke bei der Akkumulation häufig nur mit der Bewegung des Ego-Fahrzeugs korrigiert, was zu Fehlern bei der Akkumulation dynamischer Verkehrsteilnehmer führt [1]. Diese äußern sich in Form eines „Schweifs“ hinter dem

Objekt. Hier wird ein Ansatz betrachtet, der zunächst die Bewegung der einzelnen Messpunkte schätzt, um eine Korrektur der dynamischen Bewegung in der Akkumulation der Punktwolke zu ermöglichen [5].

Der zweite Ansatz basiert auf dem Konzept des Curriculum Learning [6] und überträgt es in Form eines mehrstufigen Trainingsprozesses auf die radarbasierte Objekterkennung [7]. Dabei werden Lidar- und Radardaten am Eingang des Objektdetektors kombiniert, und der Detektor wird zunächst auf diesen kombinierten Daten trainiert. Durch ein schrittweises Ausdünnen der Lidar-Punktwolke bei Beibehaltung der vollen Radarpunktwolke wird die Trainingsaufgabe schrittweise erschwert. Auf diese Weise kann das Wissen über die Umgebung aus der dichten Repräsentation des Lidars auf die vergleichsweise dünne Repräsentation des Radars übertragen werden.

Eine Limitierung des zweiten Ansatzes besteht darin, dass weiterhin Objektannotationen für den gesamten Datensatz verfügbar sein müssen. Aufgrund der hohen Kosten für die manuelle Annotation von Trainingsdaten sind aktuelle Radardatensätze jedoch in ihrer Größe begrenzt. Der dritte Ansatz zielt darauf ab, auch nicht annotierte Trainingsdaten für das Training von Radar-Objektdetektoren nutzbar zu machen. Basierend auf dem Konzept maskierter Autoencoder [8] wird ein zweistufiger Trainingsprozess mit unterschiedlichen Zielsetzungen verwendet. Im ersten Schritt besteht die Zielsetzung darin, die Eigenschaften der Lidar-Punktwolke aus der Radarpunktwolke zu rekonstruieren, um einen informationsdichten Merkmalsraum aus der Radarmessung abzuleiten. In diesem Schritt werden keine Objektannotationen benötigt. Im zweiten Schritt wird das so vortrainierte Modell für die Anwendung der Objekterkennung feinabgestimmt.

Literatur

[1] A. Palffy, E. Pool, S. Baratam, J. F. Kooij, D. M. Gavrila: „Multi-Class Road User Detection With 3+1D Radar in the View-of-Delft Dataset“. In: *IEEE Robotics and Automation Letters 2022.*

[2] P. Palmer, M. Krüger, R. Altendorfer, G. Adam, T. Bertram: „Reviewing 3d object detectors in the context of high-resolution 3+1d radar“. In: *Workshop on 3D Vision and Robotics at CVPR 2023.*

[3] X. Huang, Z. Xu, H. Wu, J. Wang, Q. Xia, Y. Xia, J. Li, K. Gao, C. Wen, C. Wang: „L4DR: LiDAR-4DRadar Fusion for Weather-Robust 3D Object Detection“. In: *AAAI 2025.*

[4] W. Xiong, Z. Zou, Q. Zhao, F. He, B. Zhu: „LXLv2: Enhanced LiDAR Excluded Lean 3D Object Detection with Fusion of 4D Radar and Camera“. In: *IEEE Robotics and Automation Letters 2025.*

[5] P. Palmer, M. Krüger, R. Altendorfer, T. Bertram: „Ego-Motion Estimation and Dynamic Motion Separation from 3D Point Clouds for Accumulating Data and Improving 3D Object Detection“. In: *Automotive meets Electronics (AmE) 2023.*

[6] Y. Bengio, J. Louradour, R. Collobert, J. Weston: „Curriculum learning“. In: *ICML 2009.*

[7] P. Palmer, M. Krüger, S. Schütte, R. Altendorfer, G. Adam, T. Bertram: „LEROjD: Lidar Extended Radar-Only Object Detection“. In: *ECCV 2024.*

[8] K. He, X. Chen, S. Xie, Y. Li, P. Dollár, R. Girshick: „Masked Autoencoders Are Scalable Vision Learners“. In: *CVPR 2022.*

Kooperative adaptive Geschwindigkeitsregelung mit variablen Zeitabständen zur kontrollierten Degradation unter zeitlich variierenden Netzwerk-Dienstgüten

Johannes Böhm

Lehrstuhl für Elektromobilität
Rheinland-Pfälzische Technische Universität
Kaiserslautern-Landau
johannes.boehm@rptu.de

Daniel Görges

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

Schlüsselwörter: Vernetztes Fahren, kooperative adaptive Geschwindigkeitsregelung, dynamischer Zeitabstand

Die kooperative adaptive Geschwindigkeitsregelung (Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC) ist eine zentrale Applikation des vernetzten Fahrens, welche u. a. einen erhöhten Verkehrsdurchsatz aufgrund geringerer Fahrzeugabstände sowie einen reduzierten Energieverbrauch verspricht. Basierend auf Entwurfsmethoden für CACC aus der Literatur [1], [2], welche Kollisionsfreiheit für zeitinvariante Kommunikationsverzögerungen garantieren, behandelt der vorliegende Beitrag dynamische und fluktuierende Netzwerk-Dienstgüten.

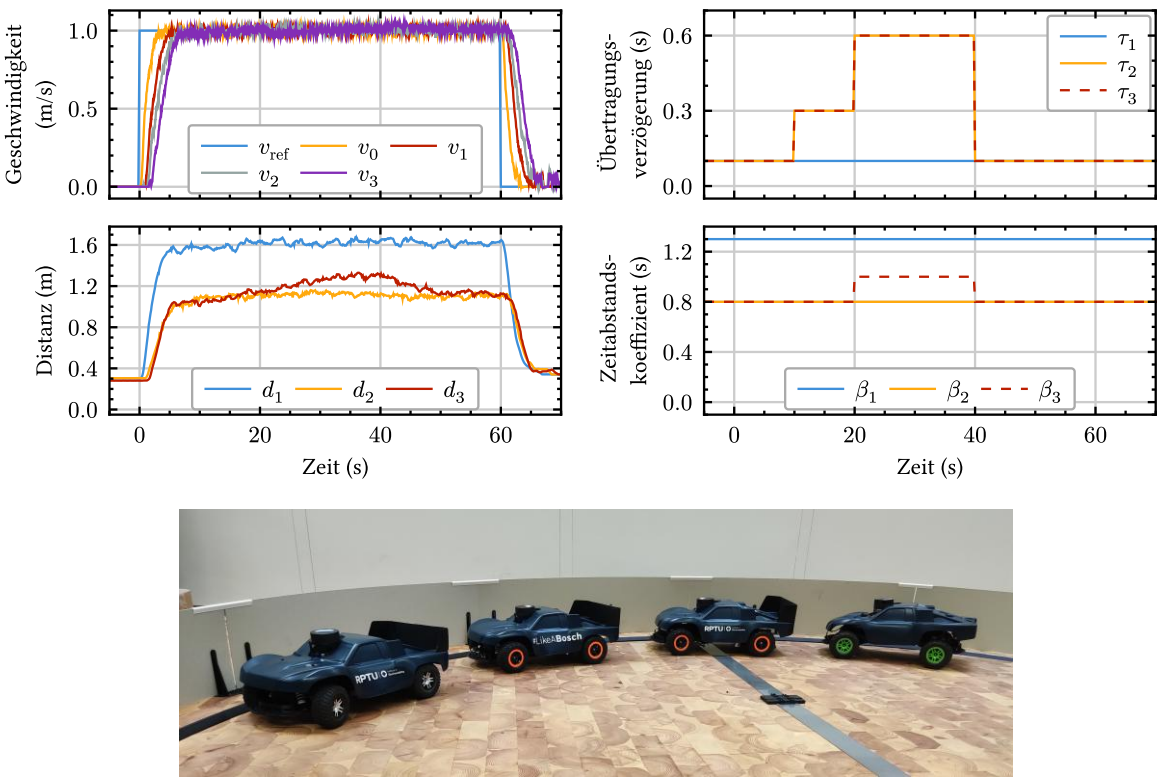


Abbildung 1: Messergebnisse zur Validierung der Regelungsstrategien (oben) und praktischer Aufbau mit vier Versuchsfahrzeugen im Maßstab 1:10 (unten).

Es wird eine Methode zur kontrollierten Degradation vorgestellt, welche den Fahrzeugabstand im Falle von stark verschlechterten Netzwerkbedingungen dynamisch vergrößert [3]. Dies erfolgt durch eine Anpassung des Zeitabstands-Koeffizienten, um im stationären Zustand weiterhin Kollisionsfreiheit zu gewährleisten. Zur Wahrung der formalen Garantien [1], [2] wird eine Regelung des Abstands zu einem virtuellen Vorderfahrzeug eingeführt. Aufgrund der resultierenden Zeitvarianz des Systems wird robuste Stabilität mithilfe des Frameworks der Integral Quadratic Constraints [4], [5] nachgewiesen.

Mittels experimenteller Untersuchungen wurde die Regelung zum virtuellen Vorgänger sowie die dynamische Distanzanpassung unter variierenden Netzwerkbedingungen validiert. Die verwendeten Versuchsfahrzeuge im Maßstab 1:10 sind zusammen mit den Messergebnissen in Abbildung 1 dargestellt. Es wird eine sprungförmige Referenzgeschwindigkeit v_{ref} vorgegeben, welcher die Fahrzeuge $i \in \{0,1,2,3\}$ mit den Geschwindigkeiten v_i folgen, wobei $i = 0$ das Führungsfahrzeug und $i \in \{1,2,3\}$ die Folgefahrzeuge bezeichnet. Zusammen mit den abgebildeten Zeitabstands-Koeffizienten β_i und einem konstanten Sicherheitsabstand von $0.3\ \mathrm{m}$ resultieren die Distanzen zum Vorderfahrzeug d_i. Aufgrund variierender Übertragungsverzögerungen τ_i zwischen Fahrzeug i und dessen Vorderfahrzeugen wird zum Zeitpunkt $t = 20\ \mathrm{s}$ der Zeitabstands-Koeffizient β_3 dynamisch angepasst, was sich in der gemessenen Distanz d_3 widerspiegelt.

Literatur

[1] J. Lunze, „Vernetzte Abstandsregelung von Fahrzeugkolonnen“, *at - Automatisierungstechnik*, Bd. 67, Nr. 12, S. 990–1006, 2019.

[2] J. Lunze, „Design of the Communication Structure of Cooperative Adaptive Cruise Controllers“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Bd. 21, Nr. 10, S. 4378–4387, 2020.

[3] J. Böhm, E. Schöneberg, K. Schmidt, W. Fischer, und D. Görges, „Cooperative Adaptive Cruise Control with Variable Time Headway for Graceful Degradation under Fluctuating Network Quality of Service“, *in Begutachtung*.

[4] A. Megretski und A. Rantzer, „System analysis via integral quadratic constraints“, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Bd. 42, Nr. 6, S. 819–830, 1997.

[5] J. Veenman, C. W. Scherer, und H. Köroğlu, „Robust stability and performance analysis based on integral quadratic constraints“, *European Journal of Control*, Bd. 31, S. 1–32, 2016.

Vision-Based UAV Navigation in Dynamic Settings using RNN with Multi-head Attention

Van Huyen Dang
PhD student
Universität Paderborn
van.huyen.dang@uni-paderborn.de

Erdal Kayacan
Lehrstuhl
Universität Paderborn
erdal.kayacan@uni-paderborn.de

Keywords: Unmanned aerial vehicles, vision-based navigation, recurrent neural network, attention map, reinforcement learning.

Aerial robots are increasingly used in various applications, including exploration, inspection, and search and rescue. These tasks often require the robot (agent) to operate safely and avoid not only static but also dynamic obstacles. Traditional approaches often rely on generating local trajectories to guarantee probabilistic collision-free paths [1]. However, these methods depend on object detection and tracking modules, which can introduce latency and degrade overall performance [2]. In this work, we propose a novel end-to-end network architecture, illustrated in Figure 1, that is trained via reinforcement learning entirely in simulation, enabling direct deployment on real-time robotic platforms without additional tuning.

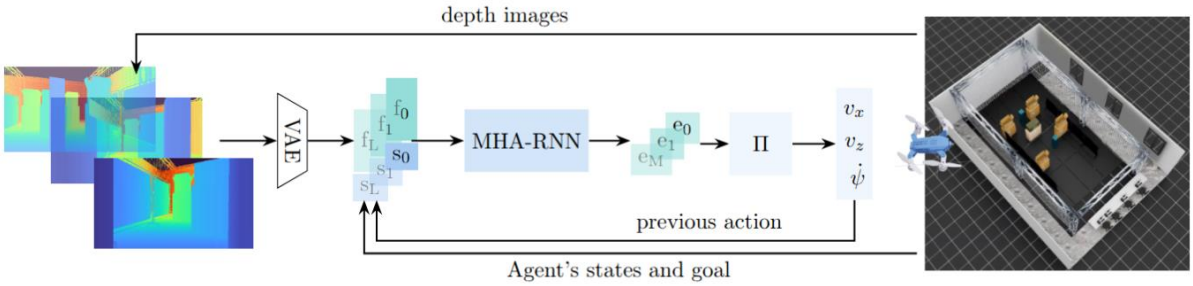


Figure 1: Our proposed network architecture combines a pretrained variational autoencoder (VAE) [3] with MHA-RNN, a network that merges a continuous-time recurrent neural network (CT-RNN) and a multi-head attention (MHA) [4]. The VAE compresses raw depth images into low-dimensional features (f). These features are combined with the agent's current state and previous actions (s), and fed into MHA-RNN, which predicts future embedding latent features (e). These predicted features are then used by the policy network (π) to output actions, including linear velocities and yaw rates.

The policy network, commonly utilizing feed-forward deep neural networks, performs well under fully observable environments but tends to be sample-inefficient and fail when observations provide only partial information about the environment. For instance, a single depth image cannot fully capture the agent's motion context. To overcome this limitation, several works have employed memory-based architectures, such as LSTMs [5], to maintain hidden states over time, often resulting in suboptimal performance. Alternatively, continuous-time recurrent models simulate the evolution of hidden states in continuous time [6, 7, 8, 9]. This design enables them to handle irregular or missing frames, capture the true continuous dynamics, and adapt their internal update rates to match environmental changes. Such adaptability is critical in robotic applications, where the agent is equipped with a forward-facing camera, providing only a partial view of its surroundings. Particularly, in dynamic settings when a new

obstacle suddenly appears, the neural network-based system can immediately accelerate its internal state updates to react in time.

To further enhance spatial awareness, our network incorporates a multi-head attention module [4], which enables the system to focus on multiple aspects of the visual input simultaneously. Each attention head can prioritize different spatial cues, such as nearby obstacles or moving objects. This combination of continuous-time recurrence and multi-head attention enables robust, reactive navigation in cluttered and dynamic environments.

References

[1] H. Zhu and J. Alonso-Mora, “Chance-constrained collision avoidance for mavs in dynamic environments,” IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 4, no. 2, pp. 776–783, 2019.

[2] V. H. Dang, A. Redder, H. X. Pham, A. Sarabakha, and E. Kayacan, "VDS-Nav: Volumetric depth-based safe navigation for aerial robots – bridging the sim-to-real gap," IEEE Robotics and Automation Letters, pp. 1–8, 2025.

[3] M. Kulkarni and K. Alexis, "Reinforcement learning for collision-free flight exploiting deep collision encoding," in 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2024, pp. 15781–15788.

[4] Vaswani, Ashish, et al. "Attention is all you need." Advances in neural information processing systems 30 (2017).

[5] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, “Long short-term memory,” Neural computation, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780, 1997.

[6] K.-i. Funahashi and Y. Nakamura, "Approximation of dynamical systems by continuous time recurrent neural networks," *Neural Networks*, vol. 6, no. 6, pp. 801–806, 1993.

[7] R. T. Chen, Y. Rubanova, J. Bettencourt, and D. K. Duvenaud, "Neural ordinary differential equations," Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 31, 2018.

[8] R. Hasani, M. Lechner, A. Amini, D. Rus, and R. Grosu, "Liquid time-constant networks," in Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, vol. 35, no. 9, 2021, pp. 7657–7666.

[9] M. Chahine, R. Hasani, P. Kao, A. Ray, R. Shubert, M. Lechner, A. Amini, and D. Rus, "Robust flight navigation out of distribution with liquid neural networks," Science Robotics, vol. 8, no. 77, p. eadc8892, 2023.