Kurzbericht zum Projektabschluss DART

ZE:	Förderkennzeichen:
Universität Paderborn	01IS20052

Vorhabenbezeichnung:

DART – Datengetriebene Methoden in der Regelungstechnik

Laufzeit des Vorhabens:

01.07.2020 bis 30.11.2024 (ursprünglich 30.06.2024)

Leitung des Vorhabens

Dr.-Ing. Julia Timmermann

Autor*innen des Abschlussberichts

Julia Timmermann, Annika Junker, Ricarda-Samantha Götte, Michael Hesse

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IS20052 gefördert. Die Verantwortung liegt bei der Autorin.

Ausgangspunkt des Projekts DART

Das Projekt *DART - Datengetriebene Methoden in der Regelungstechnik* entstand im Rahmen der Förderung von KI-Nachwuchswissenschaftlerinnen, wozu es im Jahr 2019 einen Aufruf vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gab. Dabei war es das Ziel dieser Förderlinie, die Beteiligung von Frauen in der deutschen Forschung zur künstlichen Intelligenz zu erhöhen und ihnen außerdem akademische Führungspositionen zu ermöglichen.

Das Hauptziel der Forschungsarbeiten der Nachwuchsgruppe war die synergetische Kombination modell- und datengetriebener Verfahren für regelungstechnische Aufgabenstellungen, siehe auch Abbildung 1. Dabei sollten die Vorteile und Stärken der jeweiligen Verfahren strukturell beibehalten werden: bei den Verfahren mit physikalischen Modellen deren gute Interpretierbarkeit, tiefere Einsicht in das Systemverhalten und die Wiedergabe kausaler Zusammenhänge; bei den datengetriebenen Verfahren deren Fähigkeit, physikalisch schwer beschreibbare Zusammenhänge auch ohne tiefere spezifische Anwendungskenntnisse abbilden zu können und ihre Erweiterbarkeit durch die Möglichkeit auch während des Betriebs weiter zu lernen. Der Schwerpunkt dieses Vorhabens lag somit auf der Entwicklung von hybriden Methoden, die modellgetriebene Verfahren mit maschinellem Lernen kombinieren, um größtmögliche Performanz beim Regelungsentwurf zu erzielen. Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten zeigen nun, dass hybride Methoden viele Vorteile bringen können, wenn technische Systeme nicht vollständig durch klassische physikalische Modelle beschrieben werden können. In allen Stufen des regelungstechnischen Entwurfsprozesses konnten die Forschungsarbeiten zeigen, dass durch die Nutzung von maschinellem Lernen fehlerhafte Modelle verbessert werden konnten und damit auch die Regelung des Systems profitieren konnte.

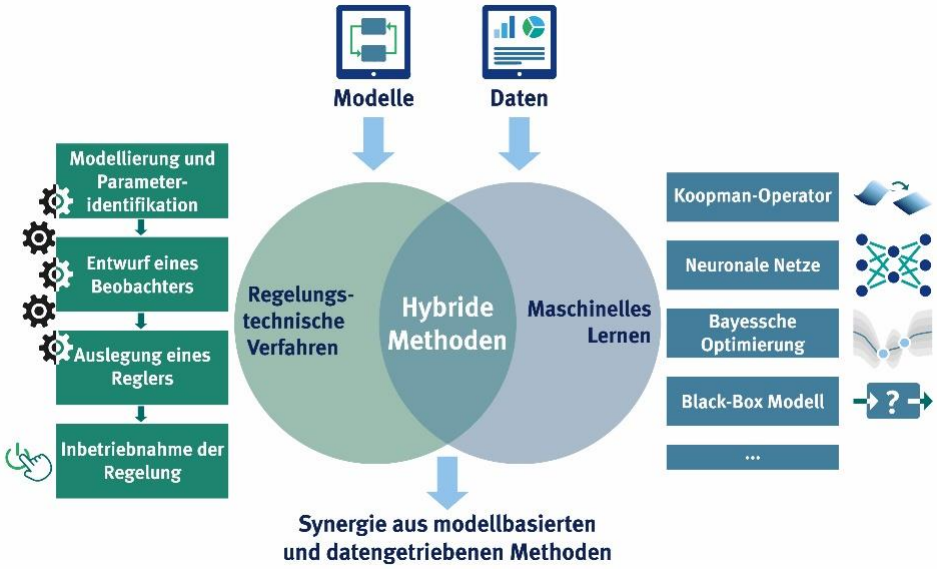

Abbildung 1: Das Projekt DART beschäftigte sich mit der synergetischen Kombination von regelungstechnischen Verfahren und Methoden des maschinellen Lernens. Dabei wurde der gesamte regelungstechnische Entwurfsprozess berücksichtigt und unterschiedliche Ansätze des maschinellen Lernens betrachtet. Es ergeben sich hybride Methoden, die Vorteile beider Seiten vereinen.

Ablauf und wesentliche Ergebnisse des Projekts

Die Nachwuchsforschungsgruppe DART arbeitete im Bereich der Anwendung von maschinellem Lernen in der Regelungstechnik. Dabei liefen die Forschungsarbeiten in der Zeit von Juli 2020 bis November 2024 an der Universität Paderborn. Der Ablauf des Projektes entsprach der ursprünglichen Planung. Zunächst stand in allen drei Teilprojekten die Bearbeitung eines Themas zu theoretischen Grundlagen der hybriden datengetriebenen Methoden an. Im Anschluss wurden neuartige Methoden entwickelt und an Anwendungen erprobt. Im vierten Projektjahr wurden einige der Methoden an

komplexen mechatronischen Systemen getestet und analysiert. Zum Projektabschluss wurde außerdem eine Monografie erstellt, die die gesamten Projektergebnisse zusammenfasst und Leser*innen Handlungsempfehlungen zum Einsatz von datengetriebenen Methoden in der Regelungstechnik zur Verfügung stellt. Die Projektergebnisse wurden in 15 Beiträgen auf nationalen und internationalen Konferenzen präsentiert und veröffentlicht. Darunter konnten Paper auf den sehr renommierten Konferenzen *European Control Conference 2023* und *IFAC World Congress 2023* platziert werden. Im Folgenden werden die drei Schwerpunktthemen des Projektes kurz vorgestellt.

Im Themenfeld der Modellierung wurde die datengetriebene Bestimmung von regelungstechnisch verwertbaren Modellen für nichtlineare mechatronische Systeme mit Ansätzen untersucht, die auf Ideen von B.O. Koopman aus dem Jahr 1931 basieren. Durch die Anwendung der Koopman-Theorie und die damit verbundene Beobachtung der Zuständen in einem allgemein höher dimensionalen Raum ist es möglich, die Evolution der Dynamik eines nichtlinearen Systems linear zu beschreiben, was im Kontext der Regelungstechnik vorteilhaft ist. Es wurden zunächst bestehende datengetriebene Modellierungsansätze, die auf dem Koopman-Operator basieren, systematisch analysiert und im Kontext ihrer Verwertbarkeit innerhalb des modellbasierten Entwurfs mechatronischer Systeme beurteilt. Darauf aufbauend wurden hybride Methoden zur Entwicklung von regelungstechnisch verwertbaren Modellen entwickelt. Dabei wurden die Vorteile der physikalischen und der datengetrieben Ansätze berücksichtigt und zusammengeführt, sodass sowohl das physikalische Vorwissen als auch die kontinuierliche Verfügbarkeit von Messdaten zur Identifikation und Adaption von Systemen genutzt werden konnten.

Ein Beobachter wird eingesetzt, um die Zustandsgrößen eines Systems zu schätzen, wenn sie nicht messbar sind, sodass anschließend eine Regelung möglich ist. Ein Ziel der Forschungsarbeiten war es, einen hybriden Beobachterentwurf für ein System zu entwickeln, für welches nur ein einfaches Modell vorliegt bzw. Modellungenauigkeiten bestehen. Gründe hierfür können die Komplexität des Systems oder der hohe Modellierungsaufwand sein. Anforderungen an einen solchen Beobachterentwurf sind eine hohe Schätzgüte, die physikalisch interpretierbare Schätzung der Modellungenauigkeiten und eine gute Nutzbarkeit des Modells für weiterführende Schritte (bspw. Regelungsentwurf). Daraus folgend wurde eine neuartige Methode erarbeitet, welche die Online-Schätzung von Modellungenauigkeiten unter Beibehaltung einer physikalisch-technischen Interpretierbarkeit erlaubt. Außerdem konnte diese zur automatischen Modellanpassung genutzt werden, um eine sukzessive Verbesserung des Modells zu erzielen und dieses bei ggf. auftretenden Systemveränderungen zu adaptieren.

Für eine effiziente und sichere Inbetriebnahme mechatronischer Systeme wurden Verfahren entwickelt, die regelungstechnische Methoden mit probabilistisch motivierten Ansätzen kombinieren. Dabei wurde davon ausgegangen, dass das vorhandene Wissen über das mechatronische System möglichst umfangreich ausgenutzt werden soll. Dies kann aus qualitativem Expertenwissen bestehen, welches zum Beispiel Regeln und Erfahrungen ausdrückt oder auch physikbasiertes Wissen über das System und den Regelungs- bzw. Steuerungsansatz, welches in Form von Differentialgleichungen oder anderen mathematischen Formulierungen festgehalten werden kann. Es wird die Gauß-Prozess-Regression in unterschiedlichen Formen verwendet, um hybride Methoden zu entwickeln, die den Inbetriebnahmeprozess erfolgreicher und sicherer machen. In der Anwendung an Systemen mit anspruchsvoller Inbetriebnahme wurden die Vorteile der probabilistischen Methodik deutlich gemacht.

Das Forschungsprojekt wurde mit einer ausführlichen Dokumentation der Ergebnisse in einer Monografie abgeschlossen, in der die hybriden Verfahren und Handlungsempfehlungen für ihre Anwendung vorgestellt werden.

Abschlussbericht DART

Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

ZE:	Förderkennzeichen:
Universität Paderborn	01IS20052

Vorhabenbezeichnung:

DART – Datengetriebene Methoden in der Regelungstechnik

Laufzeit des Vorhabens:

01.07.2020 bis 30.11.2024 (ursprünglich 30.06.2024)

Leitung des Vorhabens

Dr.-Ing. Julia Timmermann

Autor*innen des Abschlussberichts

Julia Timmermann, Annika Junker, Ricarda-Samantha Götte, Michael Hesse

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IS20052 gefördert. Die Verantwortung liegt bei der Autorin.

Inhaltliche Ergebnisse

Das Projekt *DART - Datengetriebene Methoden in der Regelungstechnik* entstand im Rahmen der Förderung von KI-Nachwuchswissenschaftlerinnen, wozu es im Jahr 2019 einen Aufruf vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gab. Dabei war es das Ziel dieser Förderlinie, die Beteiligung von Frauen in der deutschen Forschung zur künstlichen Intelligenz zu erhöhen und ihnen außerdem akademische Führungspositionen zu ermöglichen.

Das Hauptziel der Forschungsarbeiten der Nachwuchsgruppe war die synergetische Kombination modell- und datengetriebener Verfahren für regelungstechnische Aufgabenstellungen. Dabei sollten die Vorteile und Stärken der jeweiligen Verfahren strukturell beibehalten werden: bei den Verfahren mit physikalischen Modellen deren gute Interpretierbarkeit, tiefere Einsicht in das Systemverhalten und die Wiedergabe kausaler Zusammenhänge; bei den datengetriebenen Verfahren deren Fähigkeit, physikalisch schwer beschreibbare Zusammenhänge auch ohne tiefere spezifische Anwendungskenntnisse abbilden zu können und ihre Erweiterbarkeit durch die Möglichkeit auch während des Betriebs weiter zu lernen. Der Schwerpunkt dieses Vorhabens lag somit auf der Entwicklung von hybriden Methoden, die modellgetriebene Verfahren mit maschinellem Lernen kombinieren, um größtmögliche Performanz beim Regelungsentwurf zu erzielen. Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten zeigen nun, dass hybride Methoden viele Vorteile bringen können, wenn technische Systeme nicht vollständig durch klassische physikalische Modelle beschrieben werden können. In allen Stufen des regelungstechnischen Entwurfsprozesses (siehe Abbildung 1) konnten die Forschungsarbeiten zeigen, dass durch die Nutzung von maschinellem Lernen fehlerhafte Modelle verbessert werden konnten und damit auch die Regelung des Systems profitieren konnte.

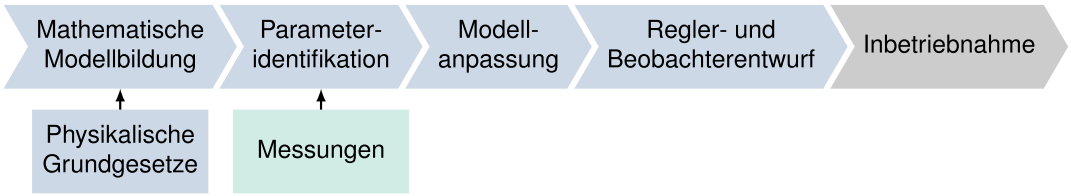

Abbildung 1: Das Vorgehen beim modellbasierten Regelungsentwurf.

Der hier vorliegende Schlussbericht des Projektes DART folgt bei der Präsentation der Ergebnisse der Struktur des Arbeitsplans. Es wurden drei unterschiedliche Teilprojekte bearbeitet, die unterschiedliche Aspekte des Regelungsentwurfs adressieren. Im vierten Projektjahr wurden die Teilprojekte dann im Rahmen des Demonstrators und der Erstellung der Abschlussmonografie zusammengeführt. Der Aufbau des Projektes ist in Abbildung 2 dargestellt.

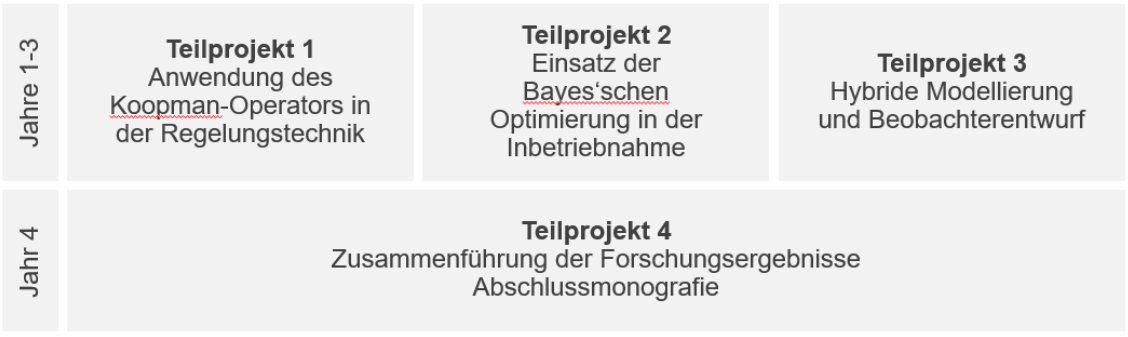

Abbildung 2: Aufbau des Projektes DART.

Ergebnisse des Teilprojekts 1: Anwendung des Koopman-Operators in der Regelungstechnik

Ziel des ersten Schwerpunkts der KI-Nachwuchsgruppe war die Analyse der regelungstechnischen Anwendbarkeit des Koopman-Operators. Dieser ermöglicht die lineare Beschreibung nichtlinearer

Systeme durch Beobachtung in einem höherdimensionalen Raum, was den Rechenaufwand bei der Prädiktion erheblich reduziert. Zudem können bewährte Entwurfsverfahren der Regelungstechnik für lineare Systeme genutzt werden. Dadurch, dass der Koopman-Operator im Allgemeinen unendlich-dimensional und daher für algorithmische Anwendungen in der Regel nicht ohne Weiteres nutzbar ist, werden in den meisten Fällen numerische Approximationsverfahren genutzt, die auf Messdaten in Kombination mit physikalischem Vorwissen basieren. Entsprechend der Forderung nach praktischer Anwendbarkeit wurde im Rahmen des ersten Teilprojekts der Begriff der *regelungstechnisch verwertbaren Form hybrider Streckenmodelle* anhand folgender Kriterien charakterisiert, vgl. [Jun24]:

- Geringer Modellierungsaufwand
- Geringer Rechenaufwand bei der Prädiktion
- Hohe Dateneffizienz
- Physikalische Interpretierbarkeit
- Nutzung von physikalischem Vorwissen
- Anwendung bestehender Entwurfsverfahren
- Adaptionsfähigkeit bei Systemveränderungen.

Die Abbildung 3 veranschaulicht die hybride Modellbildung als Alternative zum klassischen rein physikalisch motivierten modellbasierten Entwurf.

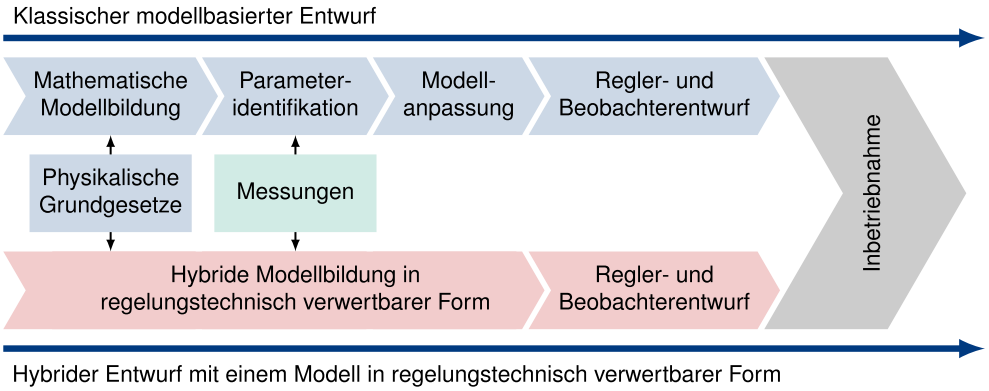

Abbildung 3: Der hybride Entwurf mit einem Modell in regelungstechnisch verwertbarer Form dient als Alternative zum klassischen modellbasierten Regelungsentwurf. In Anlehnung an [JTT22a].

Ausgangspunkt des **ersten Arbeitspakets** war eine umfangreiche Literaturrecherche sowie ein systematischer Vergleich der numerischen Approximationsverfahren des Koopman-Operators. Aufgrund der linearen Systembeschreibung und der Möglichkeit, physikalisches Vorwissen gezielt zu berücksichtigen, wurde das EDMD-Verfahren (Extended Dynamic Mode Decomposition) vertieft untersucht. Es approximiert nichtlineare Dynamiken anhand von (Mess-) Daten und physikalischem Vorwissen in Form der auftretenden Nichtlinearitäten als lineare zeitdiskrete Modelle. Anhand akademischer Beispiele wie dem Einfachpendel wurden die Prädiktionsgenauigkeit und systemtheoretische Eigenschaften (z. B. Stabilität, Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit) analysiert. Die Approximationsgüte hing maßgeblich von den gewählten Beobachtungsgrößen (Observablen) und den verwendeten Trainingsdaten ab. Die resultierenden EDMD-Modelle bildeten die Systemdynamik aufgrund der endlich dimensionalen Approximation jedoch nicht exakt ab, wodurch sie nur für einen kurzen Zeithorizont hohe Prädiktionsgenauigkeiten erzielten. Eine signifikante Verbesserung der Prädiktionsgüte auch über einen längeren Zeithorizont wurde durch ein im Rahmen der Nachwuchsforschungsgruppe entwickeltes Korrekturverfahren erreicht. Dabei erfolgt die Prädiktion im höherdimensionalen Raum mit anschließender Rückprojektion in den ursprünglichen Zustandsraum. Dieses Verfahren erhöht die Prädiktionsgenauigkeit, ist jedoch rechnerisch aufwendiger, weil die Rückprojektion in jedem Schritt erforderlich ist. Beide Verfahren wurden systematisch formalisiert und

in [JTT22a] veröffentlicht. Die resultierenden EDMD-Modelle zeigten dieselben systemtheoretischen Eigenschaften (Stabilität, Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit) wie das jeweilige Originalsystem.

Im **zweiten Arbeitspaket** wurde eine endlich dimensionale Approximation des Koopman-Operators genutzt, um ein lineares Streckenmodell eines komplexen mechatronischen Systems anhand von Messdaten zu generieren, das sich für eine modellprädiktive Regelung eignet. Dafür wurden die Ergebnisse aus dem vorausgehenden Arbeitspaket anhand des Schlagmechanismus eines Golfroboters experimentell untersucht. Das EDMD-Verfahren mit Korrektur erzielte eine höhere, das reine EDMD-Verfahren eine geringfügig schlechtere Prädiktionsgenauigkeit als ein rein physikalisches, parametrisiertes nichtlineares Modell. Die im ersten Arbeitspaket analysierten Zusammenhänge für systemtheoretische Eigenschaften wurden am Prüfstand experimentell validiert, vgl. [JTT22a]. Die EDMD-Verfahren wurden auch hinsichtlich des Rechenaufwands in einer studentischen Arbeit untersucht. Dabei wurden sogenannte Clockzyklen als Maß für den Rechenaufwand herangezogen und an kleinen Beispielen für das EDMD-Verfahren ohne und mit Korrektur sowie für klassische numerische Integrationsverfahren bestimmt. Die Analyse zeigte, dass beide EDMD-Ansätze ein vergleichbares Verhältnis zwischen Prädiktionsgenauigkeit und Rechenaufwand wie klassische Verfahren erzielen. Gleichzeitig vereinfachen sie die Modellbildung durch ihren datengetriebenen Ansatz erheblich. Das EDMD-Verfahren gewährleistet keine Stabilitäts- oder Energieerhaltung in der datengetriebenen Modellbildung. Daher wurde eine neuartige Methode zur Bestimmung von PCHD-Modellen (Port-Controlled Hamiltonian Systems with Dissipation) entwickelt, die physikalisches Vorwissen über die Energie des Systems nutzt, vgl. [JTT22b]. Diese Modelle sind besonders vorteilhaft für die Regelungstechnik, weil sie global stabile Regelungen ermöglichen und physikalisch plausibel sind. Die Methode erfordert nur grundlegendes Wissen über die Energiezusammenhänge, jedoch keine genaue Kenntnis über die nichtlinearen Differentialgleichungen. Der Algorithmus ist angelehnt an das EDMD-Verfahren, wobei die Trainingsdaten in Snapshot-Matrizen gespeichert werden und die Gradienten der im System gespeicherten Energie analog zu EDMD-Observablen als Vorwissen dienen. Simulative und experimentelle Ergebnisse zeigen eine hohe Genauigkeit bei der Approximation der nichtlinearen Dynamik und reduzieren den Modellierungsaufwand, weil lediglich Messdaten und Vorwissen über die Energie erforderlich sind. Am Beispiel des Doppelpendels und eines zweidimensionalen Multicopters wurden Grenzen der Methode sichtbar. Diese ergeben sich durch chaotische Dynamiken oder Singularitäten in speziellen Systemstrukturen, bei denen die im System gespeicherte Energie nicht von allen Systemzuständen abhängt.

Schließlich wurden die hybriden EDMD- und PCHD-Modelle auf ihre Eignung für den modellbasierten Regelungsentwurf untersucht. EDMD-Modelle lassen sich dank ihrer linearen Struktur einfach in Entwurfsmethoden wie Riccati-Regler, modellprädiktive Regelungen und Luenberger-Beobachter integrieren. Simulationen am Schlagmechanismus des Golfroboters zeigten, dass EDMD-basierte Ansätze hinsichtlich der Regelungsgüte klassischen Methoden überlegen sind und den Entwurfsaufwand erheblich reduzieren, weil das gelernte Modell direkt nutzbar ist, vgl. Abbildung 3. Datengetriebene PCHD-Modelle eignen sich für passivitätsbasierte Regelungen und bieten eine hohe physikalische Interpretierbarkeit, jedoch bei geringfügig schlechterer Regelungsgüte. Sowohl EDMD-Modelle als auch hybride PCHD-Modelle zeigen gemäß der obigen Kriterien eine hohe regelungstechnische Verwertbarkeit. Bei der Entscheidung für das am besten geeignete Entwurfsverfahren kann keine allgemeine Aussage getroffen werden. Vielmehr ist es ratsam, bei der konkreten Anwendung im Einzelfall zu prüfen, welche Art der Modellbildung zielführend ist. Es zeigt sich eine Korrelation zwischen Modell- und Regelungsgüte, weshalb die Modellgenauigkeit als Auswahlkriterium für das Regelungsentwurfsverfahren herangezogen werden kann.

Eine Herausforderung mechatronischer Systeme liegt in vorhersehbaren oder unvorhersehbaren Systemveränderungen, z. B. die Installation eines neuen Bauteils, Verschleiß oder Temperaturschwankungen während des Betriebs. Um dennoch eine gleichbleibend hohe Regelungsgüte gewährleisten zu können, muss die Informationsverarbeitung in der Lage sein, diese Änderungen zu erfassen und sich automatisch anzupassen. Ziel des **dritten Arbeitspakets** war daher die Entwicklung

selbstlernender Streckenmodelle, die sich auf Basis laufend aufgezeichneter Messdaten an veränderliches Systemverhalten anpassen, vgl. Abbildung 4. Dafür wurde zunächst in Anlehnung an [CSOW21] ein Algorithmus für ein adaptives EDMD-Modell mit einem rekursiven kleinste-Quadrate-Ansatz realisiert. Durch einen variablen Vergessensfaktor berücksichtigt das Modell vergangene Messdaten in Abhängigkeit der Intensität der auftretenden Systemveränderungen. Die Begrenzung der Spur der Kovarianzmatrix verhindert das einhergehende Risiko eines sogenannten Kovarianz-Windups. Für vollständige Zustandsregelungen, die messbare oder geschätzte Zustandsgrößen erfordern, wurde ein Beobachter integriert, der sich ebenfalls während des Betriebs anpasst. Am Schlagmechanismus des Golfroboters wurde gezeigt, dass das adaptive EDMD-Modell die Regelungsgüte auch bei starken Systemveränderungen deutlich verbessert [JPTT23]. Basierend auf den Erkenntnissen des rekursiven EDMD-Modells wurde darüber hinaus die Methode zur datengetriebenen Bestimmung von PCHD-Modellen um Adaptionsfähigkeit erweitert. Experimentelle Untersuchungen am Schlagmechanismus des Golfroboters zeigten eindrucksvoll, dass das adaptive PCHD-Modell die nichtlineare Systemdynamik mit sehr hoher Genauigkeit abbilden kann [JTT24].

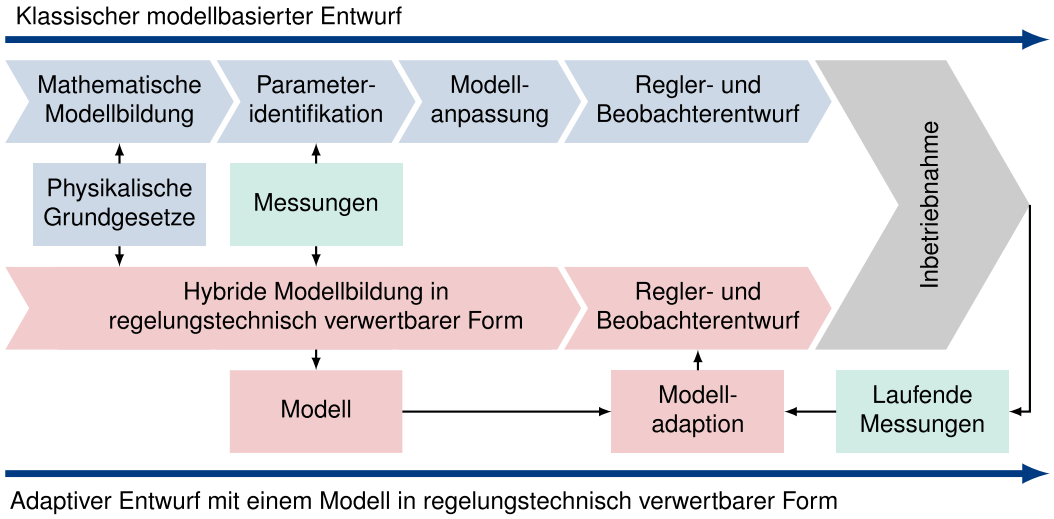

Abbildung 4: Der adaptive Entwurf ermöglicht ein hybrides Modell in regelungstechnisch verwertbarer Form, das sich während des Betriebs anpasst. In Anlehnung an [JPTT23].

Ergebnisse des Teilprojekts 2: Einsatz der Bayesschen Optimierung bei der interaktiven Inbetriebnahme von Steuerungen und Regelungen

Ziel des zweiten Teilprojekts war es zu untersuchen, wie hybride Ansätze die Inbetriebnahme von Steuerungen und Regelungen unterstützen können. Dabei sollten probabilistische Ansätze wie die Bayessche Optimierung und Gauß-Prozess-Regression genutzt werden. Die Inbetriebnahme von Steuerungen und Regelungen an realen Prüfständen ist im Allgemeinen ein schwieriger Prozess. Dabei müssen die vorab simulativ entwickelten Methoden an das reale System durch eine Feinabstimmung angepasst werden. Dies liegt z.B. an der Wahl der Modellierungstiefe, der Identifikation von Systemparametern und auch daran, dass es im Allgemeinen nicht möglich ist, alle real auftretenden Phänomene schon im Modell zu erfassen. Dieses Phänomen wird auch mit *Simulation-to-Reality-Gap* bezeichnet. Die Ergebnisse in diesem Teilprojekt zeigen, dass durch die Interaktion mit dem realen System und die dadurch gewonnenen Daten die entwickelten hybriden Methoden zuverlässig und vorteilhaft in der Lage sind die Inbetriebnahme zu unterstützen.

Ausgangspunkt des **ersten Arbeitspakets** war es, den probabilistischen Ansatz der Bayesschen Optimierung (BO) in den regelungstechnischen Kontext einzubetten. Dazu war es wichtig disziplinspezifische Begriffe mit den Begriffen des maschinellen Lernens in den Zusammenhang zu stellen. Außerdem musste geklärt werden, in welcher Form (physikalisches) Vorwissen bei einer probabilistischen Betrachtung eingebracht werden kann. Dies ist beispielsweise durch die Vorgabe der

Mittelwertfunktion des Gauß-Prozesses, der die Gütefunktion approximiert, möglich. Bei der Verwendung im allgemeinen Kontext des maschinellen Lernens wird dieser häufig zu Null gewählt, um gerade kein vorausgesetztes Wissen anzunehmen. Neben dem Mittelwert kann auch die Kovarianzfunktion verwendet werden, um Vorwissen in Form von Funktionseigenschaften, wie Glattheit oder Periodizität einzubringen. Neben der Gütefunktion können in der BO auch Nebenbedingungen durch Gauß-Prozesse approximiert werden und auch hierbei kann Vorwissen in der eben beschriebenen Form genutzt werden. Die Struktur der parametrisierten Steuerung oder Regelung muss für den Einsatz in der BO vorgegeben werden und bietet damit ebenfalls die Möglichkeit zur Berücksichtigung von prozessspezifischem Vorwissen. Zuletzt ist die Akquisitionsfunktion zu nennen, welche bspw. im Fall des Expected Improvement Kriteriums einen mindestens zu erreichenden Gütefunktionswert benötigt. Dieser Wert muss vor der Optimierung definiert werden und beinhaltet somit ebenfalls vorhandenes Wissen von Expert*innen.

Die Bayessche Optimierung mit Einbringung von Vorwissen wurde eingesetzt, um eine optimale Parametrisierung einer Steuerung anhand von Daten eines realen mechatronischen Systems im industriellen Kontext zu bestimmen. Im Rahmen einer Kooperation mit dem Fraunhofer IEM und der Firma Hesse Mechatronics wurde der Steuerungsentwurf für das Ultraschalldrahtschweißen untersucht und eine Steuerung mittels BO bestimmt. Dieses Anwendungsbeispiel ist auf Grund der komplexen physikalischen Phänomene, die bisher nicht ausreichend genau mit Simulationsmodellen abgebildet werden können, von besonderem Interesse. Es wurde ein Optimierungsproblem für die Anwendung der BO am Bondprozess formuliert, in dem nur durch die Einbringung von Vorwissen eine effektive Lösung möglich wurde, die nicht auf die Modellierung des Systems angewiesen ist, sondern nur mit den Parametern der Steuerung und Messungen an den durchgeführten Bonds arbeitet. Die Steuerung wurde durch Expert*innen in ihrem grundsätzlichen Verlauf aufgestellt und kann durch 7 Parameter variiert werden. Dies sind die Optimierungsparameter der BO und je nach Ausprägung der Steuerung entsteht ein qualitativ guter oder schlechter Bond. Zusätzlich wird eine Nebenbedingung formuliert, die im Optimierungsproblem dafür sorgt, dass es nicht zu Werkzeugaufsetzern kommt, um eine Beschädigung des Werkzeugs zu vermeiden. Für die Bewertung des Bonds werden die Scherfestigkeit und optische Kriterien verwendet, die zum einen über eine zerstörende Messung und durch Kameras bestimmt werden. Es wurde gezeigt, dass der rein datengetriebene Ansatz bessere Eigenschaften in Bezug auf Qualität und Robustheit der Lösung hat als eine vergleichend durchgeführte manuelle Identifikation. Abschließend konnte eine zerstörungsfreie Steuerung identifiziert werden die eine qualitativ hochwertige Bondverbindung erzeugt. Außerdem wurde die Effizienz des Verfahrens gesteigert, indem ein einfaches quadratisches Modell ebenfalls als Vorwissen für die Identifikation genutzt wurde. Diese Ergebnisse wurden in [HHTT22] gemeinsam veröffentlicht.

Im **zweiten Arbeitspaket** ging es um die interaktive Inbetriebnahme von Steuerungen. Das Ziel war es durch einen sequentiellen Inbetriebnahmeprozess eine optimal parametrierte Steuerung zu bestimmen, wobei dies möglichst dateneffizient und mit geringstmöglicher Anzahl an Iterationen durchgeführt werden sollte. Beim modellbasierten Steuerungsentwurf wird die Steuerung am Rechner innerhalb einer Simulationsumgebung ausgelegt und anschließend am realen System bedachtsam erprobt. Insbesondere für komplexe oder schwierig zu modellierende Systeme kann das gemessene bzw. beobachtete reale Verhalten von der Erwartung aus dem vorherigen Entwurfsprozess deutlich abweichen. Ein Grund hierfür sind fehlende oder falsche Terme in den Modellgleichungen, welche in der Simulationsumgebung für die Auslegung der optimalen Steuerung genutzt wurden. Eine Möglichkeit die Steuerung zu verbessern, besteht darin den Entwurf mit einem detaillierteren Modell zu wiederholen, wofür eine genauere Modellbildung für das System durchgeführt werden muss. Voraussetzung hierfür ist, dass der/die Ingenieur*in das nötige Expertenwissen zur Verfügung hat. Einen alternativen Ansatz eröffnet der Einsatz von maschinellem Lernen, womit die Modellgleichungen direkt aus den gemessenen Systemdaten korrigiert werden. Hierzu wurde die hybride Optimalsteuerung für dynamische Systeme auf der Grundlage von probabilistischen Gauß-Prozessen entwickelt. Das Verfahren arbeitet iterativ und hat als Ziel eine optimale Steuerung am realen System zu realisieren und

ist speziell für den Fall geeignet, in dem der vorhergehende modellbasierte Steuerungsentwurf fehlgeschlagen ist und ein bereits vorhandenes Modell als Vorwissen zur Verfügung steht. Es wird ein probabilistischer Ansatz in Form von Gauß-Prozessen dazu verwendet fehlende Systemdynamiken zu lernen, gleichzeitig eine optimale Steuerung zu berechnen und diese am realen System in Betrieb zu nehmen. Dabei wird aber regelungstechnisches Vorwissen in Form von (möglicherweise nicht vollständigen) Differentialgleichungen oder auch weitere physikalisch motivierte Informationen über das System (z.B. Beschränkungen der Zustands- und Eingangsgrößen) angenommen. In diesem Sinne lässt sich dieser Ansatz als ganzheitlich bezeichnen, da es ihm gelingt mehrere Entwicklungsschritte der Regelungstechnik (Modellbildung, Optimalsteuerung, Inbetriebnahme) gleichzeitig zu adressieren. In [HTT23] konnten wir zunächst simulationsbasiert an einem mechanischen Beispielsystem zeigen, dass das Verfahren in der Lage ist eine optimale Steuerung zu berechnen, obwohl im verwendeten Modell die grundlegenden Zentrifugalkräfte fehlten, also Abweichungen vorlagen. Außerdem wurde gezeigt, dass die Einbringung des Modells nicht nur eine schnelle Konvergenz herbeiführt, sondern auch eine energieeffizientere Lösung gefunden wurde, im Vergleich zur Anwendung des Verfahrens ohne Modell.

Im **dritten Arbeitspaket** ging es um die interaktive Inbetriebnahme von Regelungen mit einer ähnlichen Motivation wie bei den Steuerungen in Arbeitspaket zwei. Für die Inbetriebnahme einer modellbasierten Regelung an einem realen Prüfstand gibt es keine allgemein gültige Vorgehensweise. Insgesamt gesehen, ist dieser Schritt kritisch anzusehen, da eine fehlerhaft arbeitende Regelung sicherheitskritisch ist und das System beschädigen kann. Daher ist es wichtig, dass die hybriden Methoden auch berücksichtigen, dass Sicherheits- und Robustheitsanforderungen eingehalten werden.

Ein Beitrag im dritten Arbeitspaket, der diese Anforderungen erfüllt ist die hybride Optimalsteuerung, welche vor dem Hintergrund dieses Arbeitspakets um einen Regelungsentwurf ergänzt wurde. Das erweiterte Verfahren basiert auf der Verwendung der Zwei-Freiheitsgrade Regelungsstruktur, welche sich aus einem vorgesteuerten und einem geregelten Teil zusammensetzt. Der Vorteil dieser Struktur besteht darin, dass sich die beiden Teile separat voneinander auslegen lassen und damit sehr gut nachvollziehbar und interpretierbar sind. Die Auslegung der Vorsteuerung wird, wie bereits für das Arbeitspaket zwei beschrieben, durchgeführt und ergibt sich als Lösung eines komplexen Optimierungsproblems. Ergänzend wird für den geregelten Teil ein zeitvarianter Riccati-Regler angesetzt, für dessen Berechnung das hybride Dynamikmodell entlang des Mittelwertes der Zieltrajektorie linearisiert wird. Nach der Berechnung des Reglers stellt sich die Frage nach der Stabilität des Gesamtsystems. Hierfür kann das hybride Dynamikmodell, welches auf probabilistischen Ansätzen basiert, genutzt werden und eine Simulation des geschlossenen Regelkreises erfolgen. In diesem Zusammenhang gibt die resultierende Zustandsvarianz, welche sich zeitlich verändert und die Unsicherheit über die Systemdynamik beinhaltet, Aufschluss über die Stabilität. Ist die Varianz gering genug, kann geschlussfolgert werden, dass die Inbetriebnahme am realen System funktionieren wird. Andernfalls ist es notwendig weitere Daten zu sammeln, um die Unsicherheit über die Dynamik weiter zu reduzieren, was schließlich zu einer deutlich sichereren Inbetriebnahme führt. Mit dieser Vorgehensweise gelingt es in nur 5 Lerniterationen das Doppelpendel auf einem Wagen trotz gravierender Modellfehler in der oberen, instabilen Ruhelage zu stabilisieren. Damit benötigt man zum einen nur 20% der Experimente, im Vergleich zu einer Herangehensweise ohne modellbasiertes Vorwissen (siehe [HTHT18]) und ist damit sehr effizient. Zum anderen erhält man im Ergebnis auch ein erweitertes Modell, da die eingesetzten Gauß-Prozesse den Modellfehler lernen und anschließend ein verbessertes Modell vorliegt, siehe hierzu auch [HTT25].

Das zweite betrachtete Verfahren in Arbeitspaket drei ist die hybride Zustandslinearisierung. Die Methode basiert ebenso wie die hybride Optimalsteuerung auf probabilistischen Gauß-Prozessen, um Modellfehler zu identifizieren und zu korrigieren. Die Herausforderung ist es dabei, die richtigen Terme aus den aufgenommenen Messdaten zu bestimmen, welche für den Ansatz der Zustandslinearisierung notwendig sind. Hierbei handelt es sich um einen Term bezüglich der Eingangs-/Stellgröße bzw. ihrer Skalierung, und einen weiteren Term für die inhärente Dynamik des Systems (bspw. Zentrifugalkräfte). Üblicherweise stecken diese beiden Informationen zusammen im gemessenen Systemzustand, sodass

eine Separation notwendig ist. Hierfür haben sich die verwendeten Gauß-Prozesse als besonders geeignet herausgestellt. Dementsprechend ist das Verfahren in der Lage lokale Aussagen über die Güte der Zustandslinearisierung zu treffen und dies gleichermaßen in der Ausgabe der Stellgröße zu berücksichtigen. Als geeignetes Anwendungsbeispiel wurde ein Hexapod, welcher über mehrere Hydraulikzylinder dynamisch beeinflusst wird, ausgewählt. Bei diesem System ist die Genauigkeit der Zustandslinearisierung besonders wichtig, um eine hohe Regelungsgüte erreichen zu können. Es wurde ein zwei-dimensionales Hexapodmodell aufgestellt und simulative Studien daran vorgenommen. Als Modellfehler wurde in diesem Zusammenhang eine fehlerhafte Parametrierung angenommen, sodass die Regelung auf einer bestimmten Soll-Trajektorie keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferte. Durch die Korrektur mit der hybriden Zustandslinearisierung konnte in Bezug auf die Soll-Trajektorie eine deutlich höhere Güte erzielt werden. Ebenso wie bei der hybriden Optimalsteuerung bieten die verwendeten probabilistischen Gauß-Prozesse die Möglichkeit eine Aussage über die Stabilität der Regelung zu treffen. Hierfür wird die Varianz der Eingangsgröße zur Laufzeit berechnet und eine mögliche Instabilität anhand ihres nominalen Wertes abgelesen.

Ergebnisse des Teilprojekts 3: Hybride Modellierung und Beobachterentwurf

Ziel des dritten Teilprojekts war die Untersuchung hybrider Modellierungstechniken sowie die Entwicklung eines automatisierten Beobachterentwurfs. Aufgrund von Vereinfachungen oder getroffenen Annahmen besteht in der Regel eine Modell-Realitäts-Lücke, die auch bei intensiver Modellbildung nie ganzheitlich geschlossen werden kann. Zudem ist eine ressourceneffiziente Modellierung in Zeiten schnellerer Produktentwicklungszyklen und gestiegener Komplexität besonders wichtig. Daher stellen die Nutzung einfacher, physikalischer Modelle, welche effizient entwickelt werden können, aber noch Abweichungen zum System aufweisen, und die Verwendung von verfügbaren Messdaten Maßnahmen dar, um möglichst genaue hybride Modelle durch die Kombination dieser Wissenskomponenten zu erzielen und für den Beobachterentwurf zu nutzen.

Ausgangspunkt im **ersten Arbeitspaket** dieses Teilprojekts war eine umfangreiche Literaturrecherche bzgl. hybrider Modellierungsansätze in verschiedenen Disziplinen. Dabei wurde zwischen einfachen Restmodellen, die lediglich seriell den Modellierungsfehler approximieren und abbilden, und umfassenderen Modellen, die systematisch physikalisches Vorwissen und Messdaten verknüpfen, unterschieden. Anschließend wurden die recherchierten Ansätze hinsichtlich der Anwendung in der Regelungstechnik analysiert und bzgl. konkreter Anforderungen bewertet. Diese umfassten insbesondere die strukturelle Erhaltung von vorhandenem Systemwissen und die Möglichkeit, vertiefendes Systemverständnis zu erlauben. Auf dieser Grundlage wurden physikalisch motivierte neuronale Netze und physikalisch motivierte Teilkostenfunktionen im Kontext von optimierungsbasierten Lernverfahren ausgewählt, vgl. [KWRK18]. Physics-Guided Neural Networks (PGNNs) bilden ein erweitertes Fehlermodell, da sie den Modellfehler eines physikalisch motivierten Simulationsmodells durch die gleichzeitige Verwendung von Messdaten innerhalb eines vorwärts gerichteten neuronalen Netzes implizit berücksichtigen, vgl. Abbildung 5. Das Konzept, optimierungsbasierte Lernverfahren durch physikalisch motivierte Teilkostenfunktionen zu erweitern, ermöglicht, dass neben dem Fehler bzgl. der Trainingsdaten auch physikalische Konsistenz gelernt wird, beispielsweise durch die Betrachtung einer Energiebilanz. Im Rahmen der Forschung der DART-Nachwuchsgruppe wurden PGNNs zur Systemidentifikation erstmals auf nicht-autonome, mechatronische System erweitert und mittels der gewichteten Summe, einem Skalarisierungsansatz, um eine physikalisch motivierte Nebenbedingung ergänzt. Folglich muss zwar ein Mehrzieloptimierungsproblem während des Trainings gelöst werden, dieses kann jedoch als Robustheitskriterium bewertet werden, da physikalisches Vorwissen weitergenutzt wird. Am Beispiel des Golfroboters und eines Servoventils wurden die weiterentwickelten PGNNs basierend auf Messdaten der Prüfstände und durch Anwendung einer qualitativen Energiebilanz als Teilkostenfunktion evaluiert. Neben der qualitativen und quantitativen Auswertung der Modell- bzw. Prädiktionsgüte wurde zudem der Einfluss verschiedener Modellierungstiefen des physikalischen Modells analysiert. Alle Untersuchungen zeigten eine sehr hohe Modellgüte im Vergleich zu rein daten-

oder physikbasierten Modellen [GT22]. Um dem Einfluss der zeitlichen Abhängigkeit eines dynamischen Systems gerecht zu werden, wurde die Methode mit einer rekurrenten Netzarchitektur ergänzt. Diese Physics-Guided Recurrent Neural Networks (PGRNNs) wurden zudem mit einem komplexeren Mehrzieloptimierungsansatz basierend auf der Gütevektoroptimierung ausgestattet, um die Performanz des Lernens und die Modellgüte zu erhöhen. Diese nachfolgend als Multi-Objective PGRNNs (MOPGRNNs) bezeichneten Modelle konnten anhand simulativer Beispiele und aufgenommener Messdaten, z.B. vom Golfroboter, eine wesentlich höhere Modellgüte im Vergleich zu den PGNNs und rein physikalisch basierten Modellen aufzeigen [SGT22]. Trotz ihrer hohen Modellgüte besitzen die hybriden Modelle der (MO)PG(R)NNs den Nachteil, dass ihre Struktur eine Teil-Black-Box enthält und aufwendiges Training erfordert, ohne dass Einblick in die Modellungenauigkeit gewährt werden kann. Ebenso ist die Kenntnis des vollständigen Zustands erforderlich, um ein überwachtes Training durchzuführen, weshalb sich diese Methoden nicht für den automatisierten Beobachterentwurf des zweiten Arbeitspakets eignen, bei dem gerade die Zustände eines Systems nicht vollständig bekannt sind.

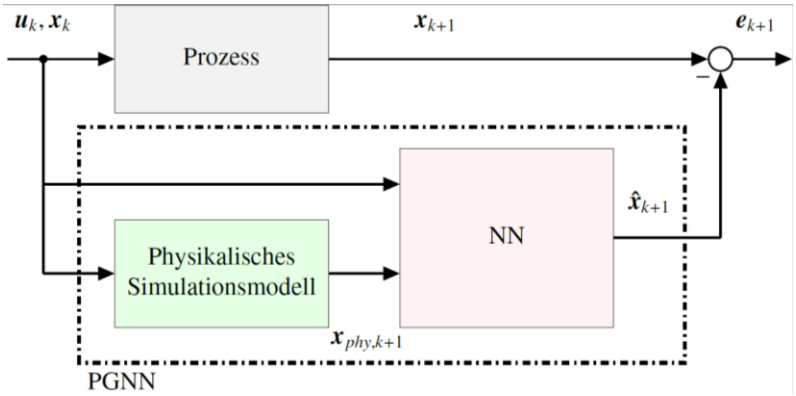

Abbildung 5: Struktur eines PGNNs währen des Trainings, bestehend aus einem physikalischen Simulationsmodell (in grün) und einem vorwärts gerichteten neuronalen Netz (in rot).

Ziel des **zweiten Arbeitspakets** war es, einen automatisierten Beobachterentwurf zu entwickeln. Ein wesentlicher Faktor, der die Schätzgüte eines modellbasierten Beobachters beeinflusst, liegt in der Qualität des verwendeten Streckenmodells. Weist dieses größere Abweichungen zur realen Strecke auf, z.B. durch getroffene Annahmen zur Modellvereinfachung oder durch die fehlerhafte Vernachlässigung dynamischer Eigenschaften, können die Zustände nicht mehr korrekt geschätzt werden und es droht oftmals die Gefahr, dass der Beobachter instabil wird und divergiert. Zunächst wurden bestehende Zustandsbeobachter bzgl. ihrer Kompensationsfähigkeit von Modellungenauigkeiten analysiert. Dazu wurden beispielsweise die Kovarianzmatrizen eines Kalman- und eines Extended-Kalman-Filter (EKF) mit Bayesscher Optimierung ausgelegt und analysiert, ob Modellungenauigkeiten im Systemmodell durch die BO kompensiert werden können. Dies gelang jedoch nur für kleinere Abweichungen und wies starke Limitationen für dynamische Modellungenauigkeiten auf. Um dieser Herausforderung zu begegnen, welche insbesondere für eine automatisierte Auslegung eines Beobachters besteht, wurde ausgehend von den vorangegangenen Erkenntnissen das Konzept der Joint Estimation entwickelt. Basierend auf der gleichzeitigen Parameter- und Zustandsschätzung wurde der Ansatz so erweitert, dass auch unbekannte Teildynamiken innerhalb des zugrunde liegenden Systemmodells simultan mit den Zuständen geschätzt werden können. Dies geschieht durch die geeignete Wahl von Linearkombinationen aus zuvor festgelegten, physikalisch motivierten Ansatzfunktionen, deren Parameter mit den Zuständen des Systems gleichzeitig geschätzt werden. Bestehende Verfahren nutzen stattdessen abstrakte Funktionen innerhalb eines EKFs, wie radiale Basisfunktionen, und ermöglichen daher keine physikalische Einsicht [KSH21]. Folglich sollen über die Ansatzfunktionen direkt physikalisches Vorwissen bzw. Hypothesen berücksichtigt und die Parameter zudem als zeitinvariant angenommen werden. Beispielsweise können bei unerwünschten Oszillationen trigonometrische Funktionen eine sinnvolle Wahl sein. Ferner wird die Annahme getroffen, dass bereits einige wenige

Ansatzfunktionen ausreichen, um das dynamische Verhalten der Modellungenauigkeit zu charakterisieren. Dies ist ein übliches Vorgehen in Methoden des maschinellen Lernens und spiegelt auch das Erfahrungswissen in den Ingenieurwissenschaften wider. Gleichzeitig ist durch den augmentierten Zustand die Gesamtsystemordnung stark erhöht und es existieren viele Freiheitsgrade, sodass die Begrenzung auf einige wenige Funktionen sinnvoll ist. Mithilfe von Methoden aus dem Compressed Sensing wurde daher eine Pseudomessung formuliert, welche den Betrag des Parametervektors mittels der L1-Norm auswertet und so garantiert, dass die meisten Einträge des Parametervektors annähernd Null sind. Dies entspricht der Darstellung der Modellungenauigkeit durch einige wenige Ansatzfunktionen. Diese Methode wurde für eingangsaffine Systeme formuliert, deren relativer Grad gleich der Systemordnung ist, was eine Beobachtbarkeit des Systems garantiert. Anschließend wurde das Verfahren innerhalb eines bestehenden Beobachtertyps umgesetzt. Hierbei handelte es sich um ein Unscented-Kalman-Filter (UKF), das sich durch eine stochastische Struktur auszeichnet und auf nichtlineare Systemdynamiken angewendet werden kann. Basierend auf Messdaten konnte der augmentierte Beobachter in mehreren simulativen Anwendungen erprobt werden, u.a. zur Zustandsschätzung des Golfroboters, dessen Reibeffekte als Modellungenauigkeit auftraten. Erste Tests zeigten dabei eine gute bis sehr gute Schätzgüte bei gleichzeitiger Kompensation der Modellungenauigkeiten [GT23a].

Anschließend wurde die zuvor beschriebene Methode überarbeitet, um die vorhandene Struktur des verwendeten Filters, also des UKFs, auszunutzen und das Verfahren insgesamt effizienter und robuster zu gestalten. Dazu wird die Annahme, dass der Parametervektor nur einige wenige Einträge verschieden von Null enthalten soll, aus stochastischer Perspektive betrachtet. Dies führt zur Modellierung des Parametervektors als Zufallsvariable einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, die diese Annahme darstellt. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Laplace-Verteilung für die Darstellung dieser Annahme zwar eignet, dadurch aber die Vorteile des UKFs nicht mehr nutzbar wären. Daher wurde die Regularized-Horseshoe-Verteilung gewählt, die die Laplace-Verteilung imitiert, aber eine Gauß-Verteilung ist und somit im UKF unkompliziert genutzt werden kann. Daraufhin wurde das Verfahren dahingehend angepasst. Verschiedene simulative Tests, u.a. erneut am Golfroboter und auch im Vergleich zur ersten Art der Umsetzung, zeigten insgesamt eine höhere Schätzgüte sowie eine glattere Darstellung der Approximation der Modellungenauigkeit [GT23b]. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse wurden vielfältige Experimente des augmentierten Beobachters durchgeführt, welche am Prüfstand des Golfroboters sowohl für den offenen als auch geschlossenen Regelkreis durch Einsetzen des Beobachters in eine Zwei-Freiheitsgrade-Struktur stattfanden. Diese zeigten eine starke Abhängigkeit der Schätzgüte und Stabilität des Beobachters von der gewählten Bibliothek auf. Als Konsequenz konnte daher die Vermutung, dass eine physikalisch motivierte Bibliothek, welche mindestens die Zustände, die Eingänge und Konstanten enthält sowie möglichst vielseitig ist, bestätigt werden. Bei geeignet gewählter Bibliothek konnten anschließend eine hohe Schätzgüte des Beobachters sowie ein Erreichen des Regelziels erfolgreich am Golfroboter umgesetzt werden. Darüber hinaus konnte bei Systemveränderungen infolge einer Zusatzmasse am Schläger eine weiterhin hohe Schätzgüte erzielt werden, welche die Adaptivität des Beobachters aufzeigt. Hierbei lässt sich insbesondere der Vorteil des augmentierten Beobachters verdeutlichen, der flexibel in der Situation von Systemveränderungen reagieren und weiterhin eine hohe Schätzgüte liefern kann. In klassischen Szenarien übersteigt der Aufwand dieser Methode jedoch u.U. den Nutzen, sodass in jenen Situationen auch ein typischer Zustandsbeobachter weiterhin eine sinnvolle Wahl sein kann. Des Weiteren wurde eine Strategie zur automatischen Extraktion der dominanten Ansatzfunktionen mittels des Parametervektors für eine Modellaktualisierung erarbeitet. Mithilfe der Hauptkomponentenanalyse lassen sich die in einer Zeitreihenmatrix gesammelten Parametervektoren der vergangenen Zeitschritte untersuchen, sodass festgestellt werden kann, welche Ansatzfunktionen die Modellungenauigkeit in diesem Zeitraum am besten und genausten beschrieben haben. Dies ermöglicht eine Modelladaption in parametrischer Form, da die Modellungenauigkeit durch einige wenige Terme in Form einer Linearkombination in physikalisch verständlicher Weise dargestellt werden kann. Um diese Flexibilität langfristig zu erhalten und eine sukzessive Verbesserung der Modellgüte zu erlauben, wurde ferner ein Gesamtkonzept zur

fortlaufenden Modelladaption entwickelt. Dieses unterscheidet anhand der Hauptkomponentenanalyse und weiterer Qualitätsgrößen, beispielsweise anhand des Modellfehlers, ob eine Aktualisierung erforderlich ist oder nicht. Zudem ermöglicht dieses Konzept die Formulierung neuer Ansatzfunktionen, falls einige nicht zielführend sind. Untersuchungen in Simulationen und am offenen Regelkreis des Golfroboters zeigten den Vorteil dieser Adaption besonders in der Situation von Systemveränderungen [GT24].

Im **dritten Arbeitspaket** des Teilschwerpunkts war das Ziel, die zuvor gewonnenen Erkenntnisse sowie entwickelten Methoden auf einen robusten Beobachtertyp zu übertragen und anzuwenden. Motiviert durch Vorarbeiten sollte dies ein Sliding-Mode-Beobachter (SMO) sein, welcher sich durch die Formulierung von diskontinuierlichen Schaltfunktionen und einer asymptotischen Konvergenz auszeichnet. Da ein SMO Abweichungen des Modells sehr robust kompensiert, wird er häufig eingesetzt, um Störungen oder Modellungenauigkeiten zu identifizieren. Zunächst galt es, die Stärken und Schwächen eines SMOs zu analysieren, um die erarbeiteten Methoden umsetzen zu können. Dabei wurde festgestellt, dass ein SMO nur bei Kenntnis einer oberen Schranke des Modellfehlers eine robuste Schätzung der Zustände erlaubt. Darüber hinaus ist mittels eines SMOs nur eine quantitative Schätzung der Modellungenauigkeit und folglich keine fortlaufende Modellaktualisierung in parametrischer Form möglich. Im Rahmen einer studentischen Arbeit wurde daher der SMO um das Konzept der Joint Estimation ergänzt. Zudem wurde statt beliebig gewählten, physikalisch motivierten Ansatzfunktionen eine Fouriertransformation für den Modellfehler durchgeführt, um beispielsweise zu erkennen, welche Frequenzen im vergangenen Zeitraum in der Modellungenauigkeit vorherrschend waren. Daraufhin konnten bei dem betrachteten Beispiel eines Einfachpendels auf dem Wagen die Frequenzen der Modellungenauigkeit identifiziert und für die Nutzung des augmentierten SMOs verwendet werden, woraufhin eine automatische Wahl der Ansatzfunktionen ermöglicht und durch Prüfstandsversuche validiert wurde [GKT23].

Ergebnisse des Teilprojekts 4: Zusammenführung der Forschungsergebnisse und Projektabschluss

Ziel des **vierten Teilprojekts** war es, die in den einzelnen Teilschwerpunkten erarbeiteten Methoden und Modelle an anspruchsvolleren Beispielen sowie am entwickelten Demonstrator zu erproben und alle Forschungsergebnisse zusammenzuführen. In allen Teilschwerpunkten wurden daher komplexe Anwendungen verwendet, um die hybriden Methoden simulationsbasiert zu testen. Im ersten Teilschwerpunkt wurde ein zweidimensionaler Multicopter untersucht, dessen Dynamik durch ein datengetriebenes PCHD-Modell approximiert wurde. Hierbei konnte aufgezeigt werden, dass abhängig von der Wahl der Energiefunktion Singularitäten im Gradienten entstehen können, die eine Anpassung des Verfahrens erfordern. Im zweiten Teilschwerpunkt wurde ein zweidimensionaler Hexapod betrachtet, dessen Vorbild ein hydraulischer Prüfstand am Lehrstuhl RtM darstellt. Mithilfe von Simulationen konnte die Anwendung der hybriden Zustandslinearisierung erfolgreich gezeigt werden, da im Vergleich zur klassischen Regelstrategie deutlich effizienter geregelt werden konnte. Im dritten Teilschwerpunkt galt es, die Zustände und die Windgeschwindigkeit einer zweidimensionalen Windenergieanlage zu schätzen, da letztere als Störgröße multiplikativ in die Dynamik der Windenergieanlage eingeht. Indem ein konstantes Störmodell angenommen wurde, ergaben sich qualitativ korrekte Schätzungen, die jedoch quantitativ nicht genau genug waren. Da die Methode für additive Modellungenauigkeiten ausgelegt ist, konnten mit diesem Anwendungsbeispiel die Grenzen aber auch das Potential für weitere Systemklassen aufgezeigt werden.

Nachdem jedes Teilprojekt eigene komplexere Anwendungen untersucht hatte und sowohl die Vorteile als auch Limitationen der hybriden Methoden aufgezeigt werden konnten, wurden Experimente am entwickelten Demonstrator durchgeführt. Dieser ist ein selbstbalancierender Würfel, der sich mithilfe von Schwungrädern auf die Kante oder die Ecke aufstellen kann. So wurde beispielsweise überprüft, ob das analytische PCHD-Modell des Würfels auch datengetrieben durch Methoden des ersten Teilschwerpunkts bestimmt werden konnte. Erfreulicherweise wurde festgestellt, dass das datengetriebene PCHD-Modell mit dem analytischen übereinstimmt. Dieses kann anschließend

gewinnbringend für eine passivitätsbasierte Regelung verwendet werden. Darüber hinaus wurde anhand von Messdaten des Würfels und mittels Methoden des zweiten Teilschwerpunkts eine hybride Optimalsteuerung durchgeführt, um den Aufschwung des Würfels auf die Kante umzusetzen. Hierbei stellte sich heraus, dass der Bremsvorgang aufgrund der Wirkung hoher Kräfte in kurzer Zeit schwierig zu modellieren und damit herausfordernd zu lernen war. Dies zeigte sich darin, dass das Modellverhalten in einigen Versuchen mit den Messungen übereinstimmte, in anderen jedoch qualitativ abwich. Somit stellt der Würfel einen geeigneten Demonstrator dar, um die Stärken aber auch die Limitationen von hybriden Methoden aufzuzeigen.

Monografie

Für die Zusammenführung der Forschungsergebnisse ist eine Abschlussmonografie des Projekts vorgesehen [GHJ+25]. Diese besteht aus den gesamten Projektergebnissen und soll es anderen Forschenden ermöglichen, an den Erkenntnissen der Nachwuchsgruppe teilzuhaben. Daher wird die Monografie neben den entwickelten Methoden und Anwendungen und zusätzlich zu den wichtigsten Grundlagen auch Empfehlungen für die Verwendung von maschinellem Lernen in der Regelungstechnik beinhalten. Der Aufbau der Monografie orientiert sich an der Projektidee entlang des regelungstechnischen Entwurfsprozesses, wobei die Anwendungsbeispiele einen besonderen Raum in Anspruch nehmen, da sie die Funktionsfähigkeit der Methoden anschaulich verdeutlichen. So werden die hybriden Methoden anhand vieler einfacher Beispiele erläutert, woraufhin Handlungsempfehlungen ausgesprochen werden. Dies erlaubt anderen Forschenden, Ingenieur*innen und interessierten Personen zu entscheiden, welche Methoden und Modelle für ihre Situation geeignet sind. Dabei werden Aspekte wie Effizienz, Interpretierbarkeit oder Anwendbarkeit abhängig von der Systemklasse berücksichtigt. Darüber hinaus widmet sich ein Kapitel ausschließlich den zwei wichtigsten Anwendungsbeispielen, dem Golfroboter und dem selbstbalancierenden Würfel. Durch die Abschlussmonografie ist die Zusammenführung der Forschungsergebnisse sowie die Verwertbarkeit der Erkenntnisse für weitere Interessierte gesichert.

Entwicklung einer hybriden Schlagstrategie für das Anwendungsbeispiel Golfroboter

Das Projekt Golfroboter verfolgt das Ziel, mit einem Roboter vollständig autonom zu putten, d. h. den Ball beim Golfspielen nach einer Trainingsphase auf dem Green von einer beliebigen Startposition aus mit nur einem Schlag in das Loch zu schlagen. Dieses Projekt wird seit einigen Jahren in Zusammenarbeit von Studierenden und wissenschaftlichen Mitarbeitenden in unserer Gruppe verfolgt. Die mechatronische Ansteuerung des Roboters lässt sich geradlinig durch klassische regelungstechnische Methoden realisieren, wohingegen sich die Analyse der Spielsituation und die Entwicklung einer Spielstrategie deutlich anspruchsvoller gestalten. Daher wird eine synergetische Kombination aus leistungsstarken datengetriebenen und bewährten physikalischen Methoden aus dem regelungstechnischen Kontext verwendet, wodurch sich dieses Projekt auch in die Ziele der Nachwuchsforschungsgruppe DART einfügt. Die unterschiedlichen Aufgaben sind in der Abbildung 6 dargestellt, wobei die Komplexität von unten nach oben zunimmt.

Die Bestimmung des optimalen Schlaggeschwindigkeitsvektors erfolgt mittels eines neuronalen Netzes, das die Dynamik des Golfballs für eine gegebene möglicherweise hügelige Spielfläche abbildet. Um die Anzahl der (zeit-)aufwändigen Interaktionen mit dem realen System zu reduzieren, werden die Trainingsdaten simulativ anhand eines physikalischen Modells erzeugt. Für eine konkrete Spielsituation wird dann anhand des trainierten neuronalen Netzes der erfolgreiche Schlaggeschwindigkeitsvektor berechnet, sodass der Ball in das Loch rollt. Falls der Ball nach der Ausführung des Schlags nicht in das Loch rollt, ist es denkbar, diesen Schlag als zusätzlichen realen Trainingsschlag zum Nachtrainieren des neuronalen Netzes zu verwenden. Die Veröffentlichungen [JFTT22a; JFTT22b] dokumentieren den Erfolg der hybriden Schlagstrategie im Labor auf einem ebenen Spielfeld als auch simulativ auf einem Spielfeld mit fiktiven Hügeln. Darauf aufbauend wurde das Spielfeld im Labor um Hügel ergänzt, indem einzelne Styroporelemente angefertigt und unter dem Rasenteppich platziert wurden, um ein Geländeprofil zu schaffen. Mittels einer Tiefenkamera wird die physische Beschaffenheit des Spielfelds

erfasst und durch Spline-Funktionen in Matlab interpoliert. Simulative Trainingsschläge wurden bereits auf dem Spline-interpolierten Spielfeld durchgeführt.

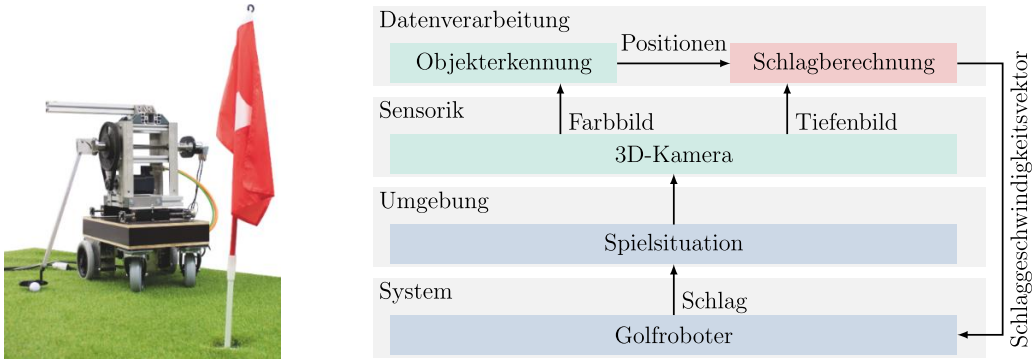

Abbildung 6: Der selbstlernende Roboter Golfi und eine Übersicht der Aufgaben für das autonome Putten.

Entwicklung und Aufbau eines Demonstrators für hybride regelungstechnische Methoden:

Für die Evaluierung der hybriden regelungstechnischen Methoden, die im Rahmen von DART entwickelt werden, wurde ein eigener mechatronischer Demonstrator erarbeitet und aufgebaut. Im Rahmen einer studentischen Arbeit wurde zunächst ein Konzept für den Prüfstand entwickelt: Es wird ein sogenannter Balance-Würfel betrachtet, der mit Hilfe von Schwungrädern entweder auf eine Kante oder eine Ecke aufgestellt werden kann. Eine Regelung des Systems ermöglicht es, dass der Würfel dort auch balanciert werden kann. Nach knapp eineinhalb Jahren Entwicklung wurde zunächst der eindimensionale Prototyp des Demonstrators in Betrieb genommen, siehe Abbildung 7 (links). Dies diente dazu, die Mechanismen für den Aufbau des kompletten Würfels zu erproben. Daher erfolgte ein Feintuning der Regelung in der oberen Ruhelage, so dass der Prototyp möglichst gut und robust stabilisiert werden kann. Außerdem wurden die Sensoren, die die Orientierung im Raum messen, kalibriert und deren Signale passend gefiltert, um mit diesen Daten geeignet weiter arbeiten zu können. Für die Bedienung des Prototypen wurde eine benutzerfreundliche Control-Desk-Oberfläche erstellt, um eine einfache Handhabung des Prüfstands sicherzustellen. Nach diesen Arbeiten waren der Aufschwung und die Stabilisierung der Würfelfläche einsatzbereit, so dass verschiedene Messungen und Tests durchgeführt werden konnten. Diese wurden anschließend dazu verwendet, das Konzept für den Würfel zu optimieren. Um auch weiteren Personen die eigenständige Bedienung des Prüfstands zu ermöglichen, erfolgte außerdem noch eine vollständige Dokumentation zum Aufbau und der Bedienung des Prüfstands.

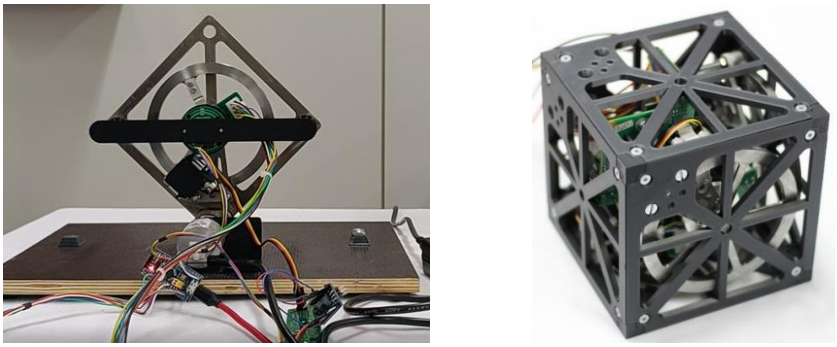

Abbildung 7: Prototyp im aufgeschwungenen Zustand (links), praktische Realisierung des 3D Würfels (rechts)

Für die Umsetzung des Würfels wurde basierend auf den Erfahrungen mit dem Prototypen und durch Abschätzung der Dimensionen mit Hilfe von Sensordaten eine CAD-Konstruktion erstellt. Dabei wurde vor allem Wert darauf gelegt, ein maximales Gewicht, das durch die Schwungscheiben nicht mehr

aufgerichtet werden kann, nicht zu überschreiten. Dies konnte durch Simulationen und experimentelle Untersuchungen am Prototypen erprobt werden. Außerdem musste berücksichtigt werden, dass der innere Aufbau des Würfels nicht symmetrisch erfolgen kann, denn nur drei Seiten des Würfels erhalten einen Aktor. Daher wurden Überlegungen zur Schwerpunktlage und deren Einfluss auf die Regelungsaufgabe angestellt. Nach diesen Vorüberlegungen konnten die weiteren relevanten Bauteile bestellt werden. Für den finalen Aufbau musste dann noch eine Platine entwickelt werden, die die Motorsteuerungen zusammenführt und damit die gesamte Ansteuerung der Komponenten im Inneren des Würfels ermöglicht. Abschließend konnte der Gesamtdemonstrator zusammengebaut und für die Inbetriebnahme vorbereitet werden, siehe Abbildung 7 (rechts). Analog zum Prototypen wurden die Signalverarbeitung und die CAN-Kommunikation sowie die Steuerungs- und Regelungsstrategie in Matlab/Simulink umgesetzt. Anschließend wurden sowohl Experimente im Rahmen klassischer Regelungsentwurfsmethoden als auch Versuche mit hybriden Methoden am Würfel durchgeführt. Letztere umfassten beispielsweise Experimente mittels der hybriden Optimalsteuerung, um den Würfel auf die Kante aufzurichten und zu stabilisieren. Dabei zeigte sich, dass der Demonstrator eine anspruchsvolle Anwendung regelungstechnischer Methoden darstellt, da der Bremsvorgang nicht einfach zu modellieren ist. Gleichzeitig können hybride Methoden bei diesen Herausforderungen unterstützen und datenbasiert ergänzen.

Mittelneutrale Verlängerung des Projektes

Das Projekt DART wurde mittelneutral verlängert, so dass sich das neue Projektende von Juni 2024 auf November 2024 verschoben hat. In der zusätzlichen Zeit sollte die Zusammenführung der methodischen Ergebnisse am Demonstrator fertig gestellt und innerhalb der geplanten Monografie geeignet dokumentiert und veröffentlicht werden. Wie im Antrag zur Projektverlängerung beschrieben, gab es bei der Entwicklung und der Inbetriebnahme des Demonstrators einige Verzögerungen. Dies lag zum einen an einer durch die Covid-19 Pandemie erschwerte Laborarbeit und entstandene Lieferverzögerungen von benötigten Bauteilen. Zum anderen war die Entwicklung und der Aufbau des Demonstrators aufwändiger als gedacht und musste zum großen Teil von studentischen Hilfskräften in Zusammenarbeit mit den wissenschaftlichen Mitarbeiter*innen durchgeführt werden, da für den Demonstrator keine zusätzlichen Personalmittel beantragt werden konnten. Durch die Projektverlängerung war es möglich die Inbetriebnahme des Demonstrators in weiten Teilen erfolgreich abzuschließen und noch einige Experimente durchzuführen und diese auch in der Monografie darzustellen, so dass am Ende wichtige Projektergebnisse zur Anwendung der entwickelten hybriden Methoden am Demonstrator in der Monografie dokumentiert sind.

Bezug zum zahlenmäßigen Nachweis

In der folgenden Tabelle 1 finden sich die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises und anschließend erfolgt eine Erläuterung der während der Projektlaufzeit entstandenen Abweichungen.

Tabelle 1: Übersicht der Projektmittel DART

	Bewilligung	Gesamtausgaben	Rest
Personalmittel	1.148.245,00	1.163.578,58	-15.333,58
Hilfskräfte	78.336,00	76.141,81	2.194,19
Sachmittel	8.235,00	1.102,66	7.132,34
Reisekosten	44.000,00	27.530,59	16.469,41
Demonstrator	41.131,00	37.525,14	3.605,86
Summe	**1.319.947,00**	**1.305.878,78**	**14.068,22**

Wie aus der Tabelle ersichtlich wird, wurden die Personalmittel im Projekt um 15.333,58€ überzogen und bei den Mitteln für Hilfskräfte ist ein geringer Restbetrag von 2.194,19€ erhalten geblieben. Die

Überziehung der Personalmittel kam durch die Verlängerung des Projektes zustande. Das ursprüngliche Projektende wurde von Juni 2024 auf November 2024 verlängert, wodurch noch ausstehende Projektziele abgeschlossen werden konnten, aber natürlich auch die Mitarbeitenden über eine längere Zeit finanziert werden mussten.

Bei den Sachmitteln und den Mitteln für den Demonstrator sind Restmittel in Höhe von insgesamt 10.728,20€ nicht verausgabt worden. Die ursprünglich eingeplanten Publikationsmittel wurden nicht benötigt, da es gelungen ist alle Veröffentlichungen bei Konferenzen zu platzieren, die die Beiträge digital, open Access und ohne zusätzliche Kosten veröffentlichen konnten. Dies ist sicherlich auch als ein Fortschritt zu sehen, der durch die Digitalisierung voran getrieben wird. Inzwischen ist es in den Ingenieurwissenschaft durchaus üblich sogar frei verfügbare Vorveröffentlichungen von Forschungsergebnissen auf Plattformen wie arXiv bereit zu stellen. Für den Demonstrator wurden in der Vorhabensbeschreibung pauschal Mittel beantragt, da erst innerhalb der Projektlaufzeit eine konkrete Idee für den Prüfstand entwickelt und umgesetzt werden sollte. Daher waren genaue Komponenten und Kosten vorab nicht abschätzbar und vom Projektträger wurde eine Auszahlungssperre auf diese Mittel als Auflage verhängt. Wie oben erläutert, wurde ein selbstaufschwingender Würfel konzipiert und entwickelt und die Kosten der benötigten Hardware wurden jeweils auf Antrag zur Verfügung gestellt. Die nicht verausgabten und gesperrten Mittel wurden schon im Herbst 2024 in Höhe von 6.309€ zurückgezahlt. Insgesamt konnte innerhalb der Projektlaufzeit ein regelungstechnischer Demonstrator entwickelt werden, der auch in Zukunft weiter verwendet wird, zum Beispiel für studentische Arbeiten, Vorführungen oder weitere Experimente, siehe Abschnitt zum Aufbau des Demonstrators.

Der größte Posten der nicht verausgabten Mittel sind Reisekosten in Höhe von 16.469,41€. Die Projektlaufzeit von DART fiel mit Förderbeginn Juli 2020 mitten in den Beginn der weltweiten Covid-19 Pandemie und diese hatte in den Jahren 2020 bis 2022 großen Einfluss auf die Möglichkeit im Rahmen der Präsentation von Forschungsergebnissen zu reisen. Daher sind in diesen Jahren die Konferenzen nur digital durchgeführt worden, so dass nur geringe Kosten entstanden sind. Auch die geplanten Netzwerktreffen und Seminare durch den Projektträger sind in dieser Zeit entweder komplett entfallen oder wurden ohne Kosten digital durchgeführt.

Insgesamt konnten die überzogenen Personalmittel durch die übrig gebliebenen Beträge in den weiteren Positionen ausgeglichen werden, sodass der ursprünglich eingereichte Förderplan eingehalten werden konnte. Durch die wie oben beschriebenen geringeren Ausgaben im Bereich der Reisemittel und der Hardware wurde dem Projektgeber ein Restbetrag von 16.881,86€ (inklusive Projektpauschale) zurück überwiesen. Dieser Betrag macht aber nur circa 1% der geförderten Gesamtmittel aus.

Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeit

Die Förderung des Projektes DART war notwendig, denn ohne die Unterstützung des BMBFs hätten die Forschungsarbeiten nicht durchgeführt werden können. Die verfolgten Ideen aus DART waren grundlagenorientiert und wären daher in dieser Form auch nicht durch Kooperationen z.B. mit der Industrie gefördert worden. Daher gab es für dieses Projekt keine andere Möglichkeit als die öffentliche Förderung.

Der ursprüngliche Mittelansatz des Projektes DART entsprach grundsätzlich den tatsächlich im Projekt aufgetretenen Aufwänden, wie es auch schon im zahlenmäßigen Nachweis aufgeführt worden ist. Es konnten drei Mitarbeitende finanziert werden, die in ihren jeweiligen Teilprojekten unterschiedliche Aspekte des regelungstechnischen Entwurfsprozesses adressiert haben (siehe auch Übersicht der Teilprojekte in Abbildung 2 und Übersicht der Projektidee in Abbildung 8). Außerdem konnte auch durch die Unterstützung von studentischen Hilfskräften erfolgreich ein Demonstrator für das Testen der hybriden Methoden aufgebaut werden. Durch die erfolgreichen Veröffentlichungen der Gruppe auf internationalen Konferenzen, bei denen jeweils ein Reviewprozess durch andere Wissenschaftler*innen durchgeführt wurde, konnte gezeigt werden, dass die im Rahmen des Projekts DART entwickelten Methoden den geforderten Beitrag und Neuerungsgrad in der wissenschaftlichen Gemeinschaft erfüllen.

Somit ist ersichtlich das wir durch unsere Forschung einen wesentlichen Beitrag in der Grundlagenforschung zu hybriden Methoden in der Regelungstechnik leisten konnten.

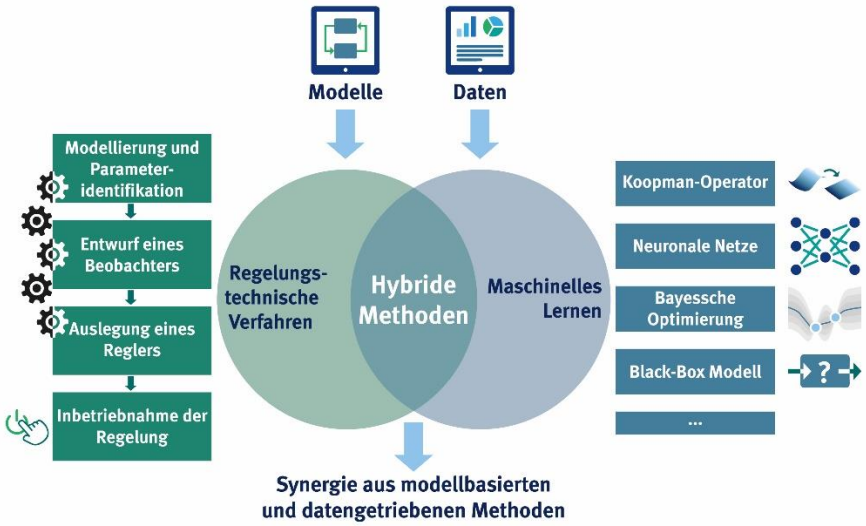

Abbildung 8: Gesamtprojektbeschreibung von DART: Ziel des Projekts war es hybride Methoden für den gesamten regelungstechnischen Entwurfsprozess (links) zu entwickeln.

Fortschritt im Forschungsgebiet bei anderen Stellen

Zu den Aufgaben des DART-Teams gehört die Beobachtung der Forschungsergebnisse anderer Wissenschaftler*innen im Bereich des maschinellen Lernens in der Regelungstechnik. Wir beschäftigen uns daher mit den aktuellen Veröffentlichungen und beziehen diese, wenn möglich und nötig, in unsere Arbeiten ein. Für alle unsere Veröffentlichungen auf Konferenzen wurde der Stand der Forschung ausgiebig recherchiert und für die Arbeiten berücksichtigt. Im Folgenden werden einige Themen aufgeführt, die Arbeiten anderer Wissenschaftler*innen beschreiben, die im gleichen Kontext wie die Forschungsgruppe DART gearbeitet haben, von denen wir uns aber abgrenzen können.

Im ersten Schwerpunkt (SP1: Anwendung des Koopman-Operators in der Regelungstechnik) sollte eine Strategie zur modellprädiktiven Regelung mittels des Koopman-Operators entworfen werden. In diesem Bereich sind inzwischen zahlreiche Veröffentlichungen erschienen. [CHZ+21], [TTMR21] und [WHV21] beschreiben die Anwendungen von EDMD-basierten modellprädiktiven Regelungen anhand eines Hochgeschwindigkeitszugs, Microgrids sowie autonomer Fahrzeugrennen. In [FKK+21] wird das Konzept der modellprädiktiven Regelung mittels SINDy sowie mittels DMD systematisch untersucht, jedoch nur anhand eines Systems, das sich eher langsam entwickelt und daher geringen Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit stellt (Modell zur Bekämpfung von Infektionskrankheiten). Wir grenzen uns von diesen Veröffentlichungen ab, indem wir einen besonderen Schwerpunkt auf das Zusammenspiel aus geringem Rechenaufwand und hoher Prädiktionsgenauigkeit legen und somit auch dynamische Systeme mit hohen Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit behandeln können. Eine weitere Forschungsrichtung war es eine Strategie für einen Koopman-Operator-basierten Regelungsentwurf mit einem selbstlernenden internen Streckenmodell zu entwerfen, das sich während des Betriebs möglichen Systemveränderungen anpasst. Die Autoren in [CSOW21] verwenden ein rekursives EDMD-Modell für eine modellprädiktive Regelung und demonstrieren die hohe Performanz anhand von Simulationen. Unser Ansatz für die Arbeiten im dritten Forschungsjahr orientiert sich zwar an diesen Arbeiten, geht jedoch weit darüber hinaus. Zum einen untersuchen wir die Methoden nicht nur simulativ, sondern auch an einem Prüfstand, indem wir starke mechanische Systemveränderungen aufprägen. Zum anderen stellt sich bei der praktischen Anwendung die Herausforderung, dass sich in den meisten Fällen nicht alle Zustände des Systems messtechnisch erfassen lassen und daher durch einen Beobachter geschätzt werden müssen. Wir zeigen in [JFTT22b], wie das rekursive Streckenmodell erfolgreich sowohl für den Regler als auch für den Beobachter verwendet werden kann und bieten damit eine ganzheitliche Lösung

für Systeme mit einer Zustandsregelung und Beobachter. Darüber hinaus enthält unser Algorithmus relevante Erweiterungen für die Berechnung des rekursiven EDMD-Modells, die das Adaptionsverhalten stark verbessern.

Im Rahmen der thematischen Arbeiten am dritten Schwerpunkt (SP 3: Hybride Modellierung und Beobachterentwurf) sind im Kontext der physikalisch motivierten NN zwei neue Veröffentlichungen zu nennen. [NKF21] beschreibt den Einsatz eines Physics-Informed Neural Networks (PINNs) in der modellprädiktiven Regelung für die Positionsregelung eines Roboters. Diese Publikation eignet sich für einen Vergleich zu unseren Methoden, da die Anwendung der PGNNs für die modellprädiktive Regelung des Golfroboters an unserem Lehrstuhl erforscht wurde. Die zweite, für uns relevante Veröffentlichung [KSH21] stellt einen Ansatz im Kontext der Joint Estimation vor, der unserem ähnelt. Die Autoren wählen hier für die Darstellung einer unbekannten Teildynamik Linearkombinationen radialer Basisfunktionen mit kompaktem Träger und verwenden dieses Modell im Rahmen eines Extended-Kalman-Filters (EKFs). Im Gegensatz dazu benutzen wir physikalisch motivierte Ansatzfunktionen für die Darstellung einer unbekannten Teildynamik und setzen dies innerhalb eines Unscented-Kalman-Filters um, der im Vergleich zum EKF ableitungsfrei ist und daher einen enormen Vorteil bietet. Ein weiterer Forschungsbereich war der automatisierte, modellbasierte Beobachterentwurf, der Modellungenauigkeiten durch eine Linearkombination physikalisch motivierter Funktionen kompensiert und schätzt. Dabei wird die Strategie verfolgt, dass nur einige wenige Funktionen relevant sein dürfen, um die Ungenauigkeit zu charakterisieren. Dieses wird durch eine spezifische Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Parameter der Linearkombination umgesetzt. In [HBK22] wird das Verfahren SINDy mittels derselben spezifischen Wahrscheinlichkeitsverteilung erweitert, jedoch mit dem Ziel, basierend auf aufgenommenen Daten eine Offline-Identifikation eines Gesamtmodells für überwiegend biologische Systeme zu erlauben (Modell zur Populationsentwicklung) und die Unsicherheit in der Identifikation zu quantifizieren. Zu dieser Veröffentlichung grenzen wir uns ab, da wir im Vergleich dazu diesen Ansatz in der deutlich aufwendigeren Online-Schätzung zur Identifikation von Teildynamiken verwenden und uns dabei auf gewöhnliche Differentialgleichungen fokussieren, wie sie in der Mechatronik und in den Ingenieurswissenschaften vorkommen. Zudem streben wir eine dauerhafte Modellaktualisierung im laufenden Prozess an, statt ein Modell nur einmalig offline zu identifizieren.

Fortschreibung des Verwertungsplans

Zum Projektabschluss beschreiben wir den Einfluss des Projektes im Sinne einer Verwertung der Projektergebnisse.

Im Rahmen des Projektes DART konnten insgesamt 15 Beiträge auf nationalen und internationalen Konferenzen präsentiert und veröffentlicht werden, siehe auch den Abschnitt zu eigenen Veröffentlichungen am Ende des Dokuments. Darunter konnten Paper auf den sehr renommierten Konferenzen *European Control Conference 2023* und *IFAC World Congress 2023* platziert werden. Die Veröffentlichungen geschahen dabei immer *open Access*, so dass sie frei verfügbar für andere Forschende sind. Dies zeigt, dass die Forschungsgruppe regelmäßig mit den Projektergebnissen im wissenschaftlichen Reviewprozess überzeugen konnte und die Ergebnisse relevant sind. Inzwischen sind die Paper zum Teil auch schon mehrfach referenziert worden, so dass ersichtlich wird, dass sie in der Forschungsgemeinschaft integriert werden.

Die Gesamtergebnisse des Projektes DART wurden in einer eigenständigen Monografie [GHJ+25] zusammengefasst und veröffentlicht. Ähnlich zur Projektidee, die den gesamten regelungstechnischen Entwurfsprozess adressiert, ist auch die Monografie an diesem orientiert. Daher werden in der Monografie die Ergebnisse nicht nach ihren Forschungsschwerpunkten sortiert, sondern es werden die entwickelten hybriden Methoden zu den jeweiligen Stufen des regelungstechnischen Entwurfsprozess zusammengefasst. So finden sich beispielsweise alle Ideen zur hybriden Modellierung in einem Kapitel wieder. Die Monografie bietet einigen Mehrwert im Vergleich zu den bestehenden Konferenzpapern. Die hybriden Methoden können dort ausführlicher und mit mehr Anwendungsbeispielen dargestellt

werden. Außerdem werden einige benötigte Grundlagen aus dem Bereich des maschinellen Lernens beschrieben, die für das Verständnis hilfreich sind. Auch werden in der Monografie zu jeder neu entwickelten Methode Handlungsempfehlungen aufgeführt, die beschreiben in welcher Situation die Anwendung die größten Vorteile bietet. So kann jeder Interessierte selbst entscheiden, ob der hybride Ansatz in Frage kommt, oder ob möglicherweise doch ein klassischer regelungstechnischer Ansatz ausreicht. Insgesamt kann gezeigt werden, dass hybride Methoden häufig gut auf Systemveränderungen reagieren können und damit adaptiv gestaltet werden können. Die Monografie ist online und frei verfügbar veröffentlicht.

Im Rahmen ihrer Arbeit am Projekt DART konnten die drei Mitarbeiter*innen des Projektes ihre Promotionen innerhalb der Projektlaufzeit sehr erfolgreich abschließen. Frau Timmermann hat dabei jeweils die Erstgutachten erstellt und es konnten hervorragende externe Zweitgutachter gewonnen werden. Die Dissertationen beschreiben Teile der Projektergebnisse in einem größeren wissenschaftlichen Zusammenhang und dienen damit auch als hervorragende Nachschlagewerke [Got24],[Jun24],[Hes24]. Außerdem sind die drei Mitarbeitenden nach dem Verlassen der Universität Paderborn durch ihre große Expertise im Bereich der hybriden Methoden Multiplikatoren in den Industrieunternehmen in denen sie nun arbeiten.

In der Projektlaufzeit haben insgesamt 24 Studierende eine studentische (Abschluss-)Arbeit beim DART-Team geschrieben. Dabei waren 4 Bachelorarbeiten, 1 Projektarbeit, 9 Studienarbeiten und 10 Masterarbeiten. Die Themen lagen dabei bei konkreten Forschungsansätzen des Projektes oder im Umfeld der Forschung an datengetriebenen Methoden in der Regelungstechnik. Das Interesse der Studierenden in diesem Bereich war groß, was auch verdeutlicht, welches Erfolgspotential diesem Thema schon von den Studierenden zugesprochen wird. Wir haben uns gefreut die Studierenden begleiten zu dürfen und wissen von vielen, die ihr Studium abgeschlossen haben, dass sie nun ihre gewonnenen Kenntnisse in Unternehmen in der Region oder überregional einbringen.

Die Grundlagen, hybriden Methoden und Anwendungsbeispiele aus dem Projekt DART werden im Rahmen der Lehre an der Universität Paderborn weiterverwendet. Im Rahmen der Reakkreditierung des Studiengangs Maschinenbau ist eine neue Vorlesung „Data Science und maschinelles Lernen“ geplant, an der Frau Timmermann mitarbeiten wird und Projektergebnisse einarbeiten wird. Die ebenfalls von Frau Timmermann präsentierte Vorlesung „Intelligente Regelungen“ wird zukünftig in der Mechatronik Vertiefung als Pflichtvorlesung angeboten und den Studierenden Inhalte im Kontext der hybriden Methoden vorstellen, die maschinelles Lernen und Regelungstechnik synergetisch kombinieren.

Im Rahmen der Projektarbeiten wurde der Würfel als ein Demonstrator entwickelt und aufgebaut (siehe Abschnitt zu inhaltlichen Ergebnissen). Inzwischen ist er weitgehend funktionsfähig und ein beeindruckendes Beispiel der Funktionalität von regelungstechnischen Anwendungen. Der Demonstrator wird zukünftig vielfältig weiter genutzt werden. Für weitere Experimente und die Erweiterung der methodischen und technischen Funktionalität werden weitere studentische Arbeiten am Würfel durchgeführt. Dadurch haben Studierende die Gelegenheit sich mit der Regelung eines realen Systems praktisch zu beschäftigen. Außerdem kann der Würfel das theoretische und abstrakte Konzept Regelungstechnik sehr gut veranschaulichen. Aktuell ist geplant den Würfel beispielsweise auf einem Sommerfest im Rahmen des 100jährigen Geburtstag von Heinz-Nixdorf der Öffentlichkeit zu präsentieren. So kann möglicherweise auch Nachwuchs im Bereich Regelungstechnik oder allgemeiner im MINT Bereich begeistert werden.

Nach einer Einladung zu einem KeyNote Vortrag im Jahr 2021 war regelmäßig Mitglieder aus dem DART-Team Teilnehmer*innen an dem Workshop des Fachausschusses 5.14 „Computational Intelligence“ der Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA). So konnten wir dort in insgesamt drei Jahren in Folge präsent sein und über unsere Forschungsarbeiten informieren und somit aktiv in einer deutschsprachigen Community beitragen, die für unser Forschungsvorhaben große Relevanz besitzt. [Tim21, JFTT22a, GKT23]

Im industriellen Kontext konnten Beiträge der Forschungsergebnisse von DART schon während der Projektlaufzeit bei der Unterstützung des Projektes ML4Pro² Maschinelles Lernen für die Produktion und deren Produkte in Kooperation mit dem Fraunhofer IEM und der Firma Hesse Mechatronics genutzt werden. Es wurde der Steuerungsentwurf für das Ultraschalldrahtschweißen untersucht und eine Steuerung mittel Bayes'scher Optimierung bestimmt [HHT+22]. Die Forschungsarbeiten wurden auf Grundlage der Idee aus [HHT+22] am Fraunhofer IEM weitergeführt und haben zu weiteren Veröffentlichungen geführt.

Eine wissenschaftlich Weiterführung der Arbeiten der Nachwuchsforschungsgruppe DART ist ebenfalls geplant. Dazu erarbeitet Frau Timmermann aktuell einen Antrag auf Einzelförderung bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der auf den Ergebnissen aufbaut, aber auch die aktuellen Forschungsergebnisse anderer Wissenschaftler*innen aufgreift. Die geplante Einreichung des Antrags ist das Jahr 2025.

Nach einer längeren Vorbereitungszeit ist im Januar 2025 eine Kooperation mit der Firma BHTC GmbH aus Lippstadt gestartet. Die Firma ist weltweit eines der führenden Unternehmen im Bereich der Klimabedienung, Thermomanagement und HMI für die Automobilindustrie. Thematisch befindet sich das Projekt im Bereich der virtuellen Sensorik und es sollen hybride Methoden getestet werden. Aktuell betreut Frau Timmermann in Kooperation mit BHTC eine Masterarbeit mit dem Thema „Hybride Modellierung als virtuelles Sensorkonzept in der Fahrzeugklimatisierung". Die Masterarbeit ist hier als Machbarkeitsstudie vorgesehen. Wenn sich dort Potentiale ergeben ist eine weitere Zusammenarbeit auch im Bereich von Forschungsaufträgen angedacht.

Im Rahmen einer internen Kooperation an der Universität Paderborn mit dem Lehrstuhl für Technische Thermodynamik gibt es Pläne für einen gemeinsamen Antrag im Bereich der KI-basierten Reduzierung der Energieaufnahme von Haushaltskühlgeräten. Dabei forscht der Lehrstuhl für Technische Thermodynamik schon seit längerem im Bereich der Alterungsprozesse von Kühlgeräten, bei denen nun zusätzlich auch eine intelligente Regelung entwickelt werden soll. Dieses Projekt ist aktuell noch in der Planungsphase.

Um weiterführend präsent zu sein, wurde eine Internetseite der Nachwuchsgruppe erstellt. Diese ist unter https://www.hni.uni-paderborn.de/nachwuchsgruppe-dart/ zu finden und wird regelmäßig aktualisiert.

Eigene Veröffentlichungen

[Tim21]: Julia Timmermann: *Data-driven Methods in Control Engineering*, Keynote Vortrag GMA Fachausschuss Computational Intelligence, 2021

[GT22]: Ricarda-Samantha Götte, Julia Timmermann: *Composed Physics- and Data-driven System Identification of Non-autonomous Systems in Control Engineering*. 3rd International Conference on Artificial Intelligence, Robotics and Control (AIRC 2022), Mai 2022

[SGT22]: Oliver Schön, Ricarda-Samantha Götte, Julia Timmermann: *Identifying Non-autonomous Dynamical Systems with Physics-Guided Recurrent Neural Networks.* IFAC-PapersOnLine 55 (2022), Nr. 12, S. 19‑24

[HHTT22]: Michael Hesse, Matthias Hunstig, Julia Timmermann, Ansgar Trächtler: *Batch Constrained Bayesian Optimization for Ultrasonic Wire Bonding Feed-Forward Control Design*. 11th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods (ICPRAM), Februar 2022

[JTT22a]: Annika Junker, Julia Timmermann und Ansgar Trächtler: *Data-Driven Models for Control Engineering Applications Using the Koopman Operator*. 3rd International Conference on Artificial Intelligence, Robotics and Control (AIRC 2022), Mai 2022

[JTT22b]: Annika Junker, Julia Timmermann, Ansgar Trächtler: *Learning Data-driven PCHD Models for Control Engineering Applications*. 14th IFAC Workshop on Adaptive & Learning Control Systems (ALCOS), Juni 2022

[JFTT22a]: Annika Junker, Niklas Fittkau, Julia Timmermann, Ansgar Trächtler: *Autonomes Putten mittels datengetriebener und physikbasierter Methoden*. 32. Workshop des GMA (Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik) Fachausschuss 5.14 „Computational Intelligence“, Dezember 2022

[JFTT22b]: Annika Junker, Niklas Fittkau, Julia Timmermann, Ansgar Trächtler: *Autonomous Golf Putting with Data-Driven and Physics-Based Methods*. IEEE Robotic Computing (IRC), Dezember 2022

[GT23a]: Ricarda-Samantha Götte, Julia Timmermann: *Estimating States and Model Uncertainties Jointly by a Sparsity Promoting UKF*. IFAC-PapersOnLine 56 (2023), Nr. 1, S. 85‑90

[GT23b]: Ricarda-Samantha Götte, Julia Timmermann: *Approximating a Laplacian Prior for Joint State and Model Estimation within an UKF.* IFAC-PapersOnLine 56 (2023), Nr. 2, S. 869‑874

[GKT23]: Ricarda-Samantha Götte, Jo Noel Klusmann, Julia Timmermann: *Data-driven identification of disturbances using a sliding mode observer*. Proceedings - 33. Workshop Computational Intelligence: Berlin, 23.-24. November 2023. Hrsg. von Schulte, H.; Hoffmann, F.; Mikut, R. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2023, S. 113‑123

[HTT23]: Michael Hesse, Julia Timmermann, Ansgar Trächtler: *Hybrid Optimal Control for Dynamical Systems using Gaussian Process Regression and Unscented Transform*. 21st European Control Conference (ECC), Juni 2023

[JPTT23]: Annika Junker, Keno Pape, Julia Timmermann, Ansgar Trächtler: *Adaptive Koopman-Based Models for Holistic Controller and Observer Design*. 3rd Modeling, Estimation and Control Conference (MECC), Oktober 2023

[Jun24]: Annika Junker: Datengetriebene *Modellbildung für nichtlineare mechatronische Systeme in regelungstechnisch verwertbarer Form*. Dissertation, Universität Paderborn, 2024.

[Got24]: Ricarda-Samantha Götte: *Online-Schätzung von Modellungenauigkeiten zur automatischen Modelladaption unter Beibehaltung einer physikalisch-technischen Interpretierbarkeit*. Dissertation, Universität Paderborn, 2024.

[Hes24]: Michael Hesse: *Interaktive Inbetriebnahme von Steuerungen und Regelungen für partiell bekannte dynamische Systeme mittels Gauß-Prozess-Regression*. Dissertation, Universität Paderborn, 2024.

[JTT24]: Annika Junker, Julia Timmermann, Ansgar Trächtler: *Adaptive Data-Driven Models in Port-Hamiltonian Form for Control Design*. PAMM. 2024;25(1).

[GT24]: Ricarda-Samantha Götte, Julia Timmermann: *Online learning with joint state and model estimation*. PAMM. 2024; 25(1).

[HTT25]: Michael Hesse, Julia Timmermann, Ansgar Trächtler: *Robust and Efficient Hybrid Optimal Control via Gaussian Process Regression and Multiple Shooting with Experimental Validation on a Double Pendulum on a Cart*. PAMM. 2025; 25(1)

[GHJ+25]: Ricarda-Samantha Götte, Michael Hesse, Annika Junker, Luis Schwarzer, Julia Timmermann: DART – Datengetriebene Methoden in der Regelungstechnik, Abschlussmonografie, Universität Paderborn, Heinz-Nixdorf-Verlagsschriftenreihe, Band 430, 2025

Literatur

[CHZ+21]: B. Chen, Z. Huang; R. Zhang; et al: *Data-Driven Koopman Model Predictive Control for Optimal Operation of High-Speed Trains*. IEEE Access, (9), 2021, S. 82233–82248

[CSOW21]: H. M. Calderon, E. Schulz; T. Oehlschlagel, H. Werner: *Koopman Operator-based Model Predictive Control with Recursive Online Update*, European Control Conference (ECC), 2021, pp. 1543–1549

[FKK+21]: U. Fasel; E. Kaiser; J. Kutz; B. Brunton; S. Brunton*: SINDy with Control: A Tutorial*, 2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2021

[HBK22]: S. M. Hirsh, D. A. Barajas-Solano, N. J. Kutz: *Sparsifying priors for Bayesian uncertainty quantification in model discovery*, 2022. In: Royal Society open science, 9(2) 2022, Article ID 211823

[HTHT18]: M. Hesse, J. Timmermann, E. Hüllermeier, A. Trächtler: A Reinforcement Learning Strategy for the Swing-Up of the Double Pendulum on a Cart, Procedia Manufacturing (24), 2018, pp. 15-20

[KSH21]: Kullberg, A.; Skog, I.; Hendeby, G.: *Online Joint State Inference and Learning of Partially Unknown State-Space Models*. IEEE Transactions on Signal Processing 69 (2021), S. 4149‑4161

[KWRK18]: Karpatne, A.; Watkins, W.; Read, J.; Kumar, V.: *Physics-guided Neural Networks (PGNN): An Application in Lake Temperature Modeling*. 2018. https://arxiv.org/pdf/1710.11431v2.pdf (besucht am 26. 01. 2024)

[NKF21]: J.Nicodemus, J. Kneifl, J. Fehr, B. Unger: *Physics-informed neural Networks-based Model Predictive Control for Multi-link Manipulators*, 2021, Preprint, https://arxiv.org/abs/2109.10793

[TTMR21]: V. Toro; D. Tellez-Castro; E. Mojica-Nava; N. Rakoto-Ravalontsalama: *Data-Driven Voltage Secondary Control for Microgrids*: 2021 IEEE 5th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), 2021, S. 180–185

[WHV21]: R. Wang; Y. Han; U. Vaidya: *Deep Koopman Data-Driven Optimal Control Framework for Autonomous Racing*, 2021