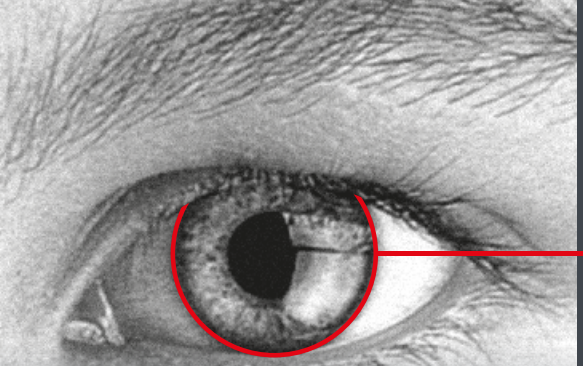


IM BLICKPUNKT

ISSN 1614-8185

DEUTSCHLANDS exzellenz-INSTITUTE

**Universität Stuttgart**
Institut für Steuerungstechnik
der Werkzeugmaschinen und
Fertigungseinrichtungen

HERAUSGEGEBEN VOM INSTITUT FÜR WISSENSCHAFTLICHE VERÖFFENTLICHUNGEN
UND DER **ALPHA** INFORMATIONSGESELLSCHAFT MBH

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen

# WIR STEUERN ZUKUNFT

www.isw.uni-stuttgart.de

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen
und Fertigungseinrichtungen
Seidenstr. 36
70174 Stuttgart



# VORWORT

**Das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart ist führend auf den Gebieten der Fertigungsautomatisierung und Produktions-IT. Am ISW wird innovative grundlagenorientierte Forschung betrieben und in vielfältigen Kooperationen gemeinsam mit der Industrie gewinnbringend in die Praxis überführt.**

Alexander Verl,
Institutsleiter ISW

Oliver Riedel,
Institutsleiter ISW

Die Kernkompetenzen des ISW im Bereich der industriellen Steuerungs-, Regelungs- und Antriebstechnik sowie der Produktions-IT auf dem Shopfloor und der Produktionssteuerung werden kontinuierlich durch neue innovative Methoden aus der Mathematik, Softwaretechnik sowie Verarbeitung großer Datenmengen und Künstlicher Intelligenz erweitert.
Zur Mission der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gehören Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten zu neuartigen Steuerungs- und Regelungskonzepten, deren Umsetzungen vom miniaturisierten embedded computing bis hin zu cloudbasierten Lösungen reichen. Innovationen bezüglich Fähigkeiten und Funktionen zukünftiger Produktionsmittel stecken zunehmend in deren Software. Auch hier arbeitet das ISW führend an Möglichkeiten zum Software-Defined Manufacturing, um flexible und früh im Entstehungsprozess evaluierbare Betriebsmittel zu ermöglichen. Die Forschungsarbeiten in der industriellen Vernetzung durch konvergente Netze decken dabei koexistierende Protokolle der harten echtzeitbehafteten Prozessebene bis hin zur Maschinenvernetzung in die Edge und die Cloud ab. Ebenso liegt der Fokus auf den Engineering Methoden und neuen produktionsnahen IT-Ansätzen im Produktentstehungsprozess. Speziell durch Forschung im Bereich der Simulation und dem Prozess-Engineering wird die steigende Komplexität in der Produktentwicklung und den Produktionsprozessen beherrschbar gemacht und das automatische Generieren von Software ermöglicht.
Diese Broschüre gibt einen Überblick über die aktuellen Forschungsaktivitäten, die Angebote für die Industrie und das Lehrangebot, aber auch über das umfangreiche Netzwerk in Wissenschaft und Industrie des Instituts. Zahlreiche internationale Kontakte, eine anhaltend rege Publikationsaktivität, exzellente Industrienähe, eine gefragte und nachhaltige Lehrtätigkeit sowie das Management der Studiengänge Mechatronik B.Sc. und M.Sc. verleihen dem ISW besondere Bedeutung und Stärke.

Wir freuen uns auf zukünftige Herausforderungen und intensiven Kontakt mit Ihnen!

# INHALTSVERZEICHNIS

**Vorwort** ..... 1

**Institutsstruktur** ..... 6
Gruppe 1: Software- und Engineeringmethoden ..... 8
Gruppe 2: Industrielle Steuerungstechnik ..... 8
Gruppe 3: Echtzeitkommunikation und Steuerungshardware ..... 9
Gruppe 4: Antriebssysteme und -regelung ..... 10
Gruppe 5: Mechatronische Systeme und Prozesse ..... 10
Gruppe 6: Virtuelle Methoden in der Produktionstechnik ..... 11
Partnerinstitute ..... 13

**Forschung** ..... 14
Forschungsprojekte ..... 14
Dienstleistungen für die Industrie ..... 134

**ELEKTRISCHE ANTRIEBSTECHNIK**
Entwicklung | Produktion | Vertrieb

KOCO MOTION

Servomotoren mit integrierter Steuerung

KannMOTION-Plattform

Schrittmotor-Steuerungen

DC-Motoren (eisenlos)

BLDC Innenläufer und Außenläufer

Servomotoren und Servosteuerung

Schrittmotoren und Linearaktuatoren

AC-Kleinmotoren und Getriebe

Torque Motoren

PROFINET CANopen Modbus EtherNet/IP 422 RS 485 SERIAL EtherCAT

www.kocomotion.de ... Intelligence in motion





# INHALTSVERZEICHNIS

**Lehre** ..... 138
Lernen am Modell ..... 138
Vorlesungen, Übungen, Praktika und Kurse ..... 140
Abgeschlossene studentische Arbeiten ..... 142
Abgehaltene Prüfungen ..... 156
Exkursionen für Studierende ..... 157
Auszeichnungen ..... 158
ISW ACADEMY ..... 161
Sonstige studentische Veranstaltungen ..... 162
Abgeschlossene Dissertationen ..... 164
Hochschulkontakte ..... 177

**Öffentlichkeitsarbeit** ..... 182
Mitgliedschaften ..... 182
Mitarbeit an Selbstverwaltungsaufgaben der Universität ..... 182
Ehrenamtliche Mitarbeit in Institutionen, Ausschüssen und Verbänden ..... 183
Aktive Teilnahme an Messen und Ausstellungen ..... 184

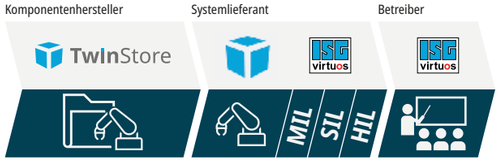
## ISG – Technologiepartner zur Virtuellen Inbetriebnahme und für das Digitale Engineering

**In wenigen Klicks zum Digitalen Zwilling**
Die Erstellung von Digitalen Zwillingen kann eine zeitaufwändige und kostenintensive Aufgabe sein. Der TwinStore® bietet die Möglichkeit, direkt auf vom Hersteller bereitgestellte, **echtzeitfähige 4D-Modelle** zurückzugreifen, um Digitale Zwillinge für eine virtuelle Inbetriebnahme zu erstellen. Die Verfügbarkeit eines Digitalen Zwillings im TwinStore® erleichtert jedoch nicht nur das Digitale Engineering auf Kundenseite, gleichzeitig dient sie Herstellern als entscheidendes Verkaufsargument in Kundengesprächen.

Christian Göltl
Product Manager Controls & Digitalization bei WEISS GmbH

„Die Simulationsmodelle im TwinStore® öffnen uns die nächste Dimension in Kundengesprächen."

**Inbetriebnahme verkürzen**
Durch die Erstellung eines echtzeitfähigen Digitalen Zwillings können Fehler frühzeitig identifiziert, behoben und Prozesse optimiert werden. Dies ermöglicht einen effizienten Start, ohne teure Nachbesserungen in der späteren realen Inbetriebnahmephase. Die Simulationssoftware ISG-virtuos begleitet Sie dabei **vom Early Engineering bis hin zur Betriebsphase**. Dank der durchgängigen Lösung können Sie erstellte Digitale Zwillinge sowohl für Schulungs- und Vertriebszwecke verwenden, als auch für Verhaltenstests an Software- oder Hardware-Steuerungen anschließen – lange bevor Ihre reale Maschine hochläuft.



Mit TwinStore® und ISG-virtuos effizient zur Inbetriebnahme

**Kontakt:**
Dr.-Ing. Christian Scheifele
christian.scheifele@isg-stuttgart.de

# INHALTSVERZEICHNIS


Maschinenausstattung ..... 188

Veröffentlichungen und Vorträge ..... 190

Weitere ISW-Events ..... 196

Stellenausschreibung ..... 198

Kontakt ..... 199

Impressum ..... 200



AUTOMATION
für die Industrie
von morgen

stein® AUTOMATION | NEXT LEVEL CONVEYOR TECHNOLOGY

WIR SUCHEN DICH!

- Programmierer/in Automatisierungstechnik/SPS (m/w/d)
- Fachinformatiker/in (m/w/d)

Die Jobbeschreibungen findest Du unter www.stein-automation.de

Die STEIN Automation ist spezialisiert auf die Entwicklung und Herstellung von intelligenten Transfersystemen zur Vereinfachung und Optimierung von Montageprozessen in industriellen Produktionsanlagen. Mit unserer Logistiksteuerung vertreiben wir seit 1992 unsere langjährige Logistik und Datenverarbeitungserfahrung am Markt. Als international tätiges Unternehmen haben wir uns viel vorgenommen. Dafür suchen wir begeisterte, hochmotivierte Unterstützung für unser Team.

**Überzeuge uns mit Deiner Bewerbung und sende diese per E-Mail an bewerbung@stein-automation.de**
STEIN Automation GmbH & Co. KG · Personalabteilung - Frau Alessandra Noailles · Carl-Haag-Str. 26 · 78054 VS-Schwenningen





[ MX11-0IG ]

Steckbare Systemlösung für die schaltschranklose Automatisierung: das MX-System

- hochflexible und schaltschranklose Automatisierungslösung
- robustes, wasser- und staubdichtes Design (Schutzart IP67)
- Plug-and-play mit steckbaren Funktionsmodulen für IPC, Koppler, I/O, Drive, Relais und System
- standardisierte Steckverbinder zur Übertragung von Daten und Leistung
- EtherCAT-Kommunikation
- langjährig bewährte Anschlussstecker für die Feldebene
- geringer Engineering-Aufwand
- hohe Zeit- und Kostenersparnis
- integrierte Diagnosefunktionen

Lernen Sie die Welt der schaltschranklosen Automatisierung kennen!

New Automation Technology BECKHOFF

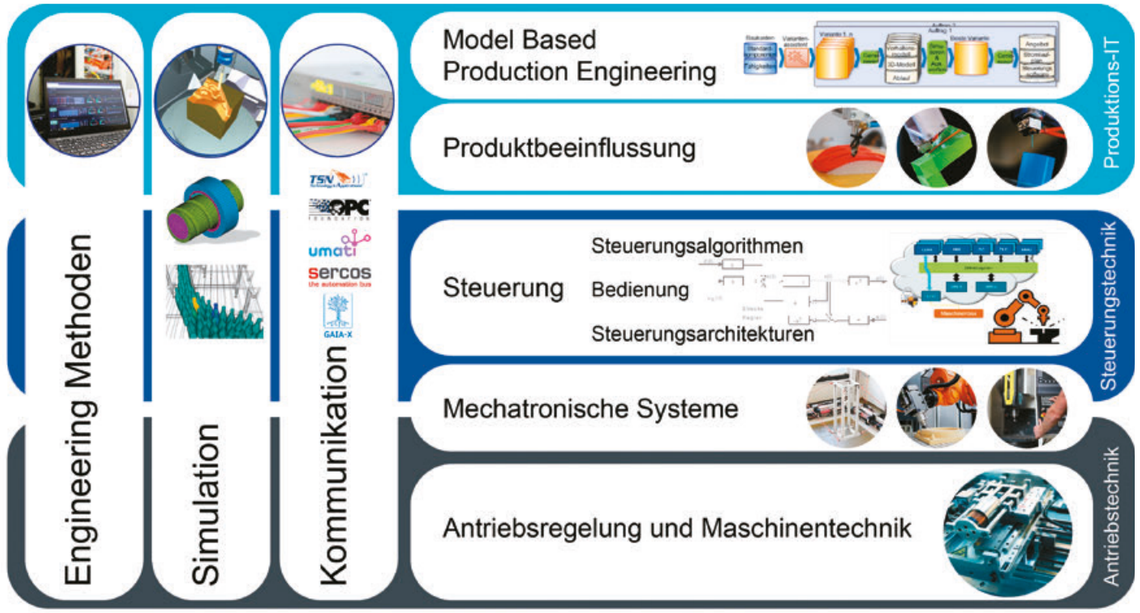
# INSTITUTSSTRUKTUR

**Das ISW besteht aus den beiden Professuren Steuerungstechnik und Mechatronik für Produktionssysteme von Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl und Produktionstechnische Informationstechnologien von Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel. Gemeinsam bilden die beiden Institutsleiter die Doppelspitze des ISW. Diese soll nach der anstehenden Evaluierung von Jun.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Andreas Wortmann mit der Widmung Modellbasierte SW-Entwicklung in der Produktionsautomatisierung zu einer Dreierspitze ausgebaut werden. Stellvertretender Institutsleiter ist der geschäftsführende Oberingenieur Herr Dr.-Ing. Armin Lechler. In der erweiterten Institutsleitung unterstützt nun neben Herrn Michael Seyfarth, der das Thema Lehre verantwortet, Herr Michael Neubauer das ISW als CTO in der Forschungskoordination**

Die Forschungsgebiete des ISW erstrecken sich über unterschiedliche Bereiche, die in sieben Gruppen gegliedert sind. Im Rahmen des InnovationsCampus Mobilität der Zukunft (ICM) konnte eine neue Nachwuchforschergruppe „Grey-Box-Modellierung für die Fertigungstechnik“ gestartet werden.
Im Einzelnen handelt es sich um die folgenden Forschungsschwerpunkte:

- **Softwareengineering und Engineeringmethoden**
- **Industrielle Steuerungstechnik**
- **Echtzeitkommunikation und Steuerungshardware**
- **Antriebssysteme und -regelung**
- **Mechatronische Systeme und Prozesse**
- **Virtuelle Methoden in der Produktionstechnik**
- **Grey-Box-Modellierung in der Fertigungstechnik**

Die einzelnen Gruppen führen grundlagenorientierte und anwendungsnahe Forschung sowie Auftragsforschung für die Industrie zu den einzelnen Schwerpunkten durch und bauen diese durch innovative Ideen stetig weiter aus. Als voller Erfolg bei der Unterstützung von Lehrveranstaltungen hat sich das studentische Applikationslabor zur Aus- und Weiterbildung von Ingenieurinnen und Ingenieuren in Richtung IT erwiesen. Die zentralen Dienste des Instituts unterstützten den Erfolg durch Übernahme von administrativen Aufgaben bei der Studierendenbetreuung, Organisation der Lehre, dem Rechnungswesen und dem Sekretariat sowie der Assistenz der Institutsleitung. Das technische Büro koordiniert u.a. Veranstaltungen und Öffentlichkeitsarbeiten und stellt für wissenschaftliche Arbeiten Services für Fotografie und Grafik zur Verfügung. Die Werkstätten für mechanische Bearbeitung, Elektrik und Elektronik setzen sich am Institut für eine schnelle und zuverlässige Umsetzung von Versuchsständen, Prototypen, Praktikumsaufbauten und Funktionsmustern ein.




Kernkompetenzen des ISW

Stand: Mai 2023

## GRUPPE 1: SOFTWARE- UND ENGINEERINGMETHODEN

**Forschungsschwerpunkte:**

### Softwaremethoden

- Innovative Entwicklungs- und Projektierungsmethode: simulationsgestützt, funktional, baukastenbasiert, u. a. für Fertigungseinrichtungen
- Funktionale Betrachtung von IT-Anforderungen
- Cloudbasierte Systemarchitekturen für die Automatisierungstechnik
- Fähigkeitsbasiertes Scheduling von Aufträgen

### Engineeringmethoden

- Modellbasierte Prozess- und Bahnplanung
- Aufgaben- und Ablaufplanung hybrider Fertigungsprozesse (additiv und subtraktiv)
- Deploymentstrategien von Software für die Produktionstechnik

### Systemanalyse und -optimierung

- Datengetriebene Identifikation von System(fehl)verhalten
- Informations- und Systemmodellierung: Prozessplanungs-, Daten-, Semantik- und Kommunikationsmodelle

**Kontakt:**
Carsten Ellwein, M.Sc.
carsten.ellwein@isw.uni-stuttgart.de

## GRUPPE 2: INDUSTRIELLE STEUERUNGSTECHNIK

**Forschungsschwerpunkte:**

### Steuerungstechnik

- NC-Kernfunktionalität (Bahnplanung und Trajektoriengenerierung)
- Herstellerspezifische und übergreifende Steuerungsschnittstellen
- Steuerungsarchitekturen und dezentrale Systeme

### Kommunikationstechnik

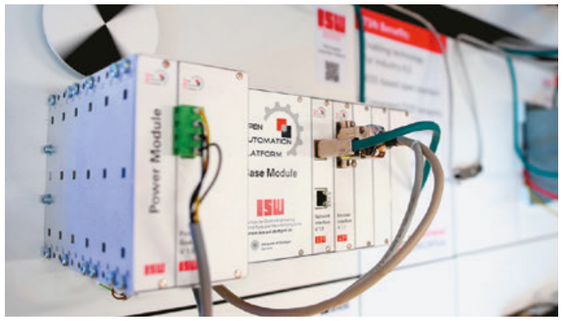
- Netzwerkkommunikation in Produktionsnetzwerken
- TSN-basierte Kommunikation
- OPC UA Schnittstellen und Spezifizierung von branchenweiten Informationsmodellen
- Normung, Spezifikation und Test

### Technologietransfer

- Erweiterung der klassischen Steuerungstechnik mit Hilfe von maschinellen Lernansätzen
- Konzepte für die Steuerungstechnik der Zukunft, plattform- und servicebasierte Steuerungsarchitekturen, Verwendung von Gaia-X Services und Blockchaintechnologie, Konzeptionierung eines Betriebssystems für die industrielle Produktion, u.a.

**Kontakt:**
Timo König, M.Sc.
timo.koenig@isw.uni-stuttgart.de

## GRUPPE 3: ECHTZEIT-KOMMUNIKATION UND STEUERUNGSHARDWARE




**Forschungsschwerpunkte:**

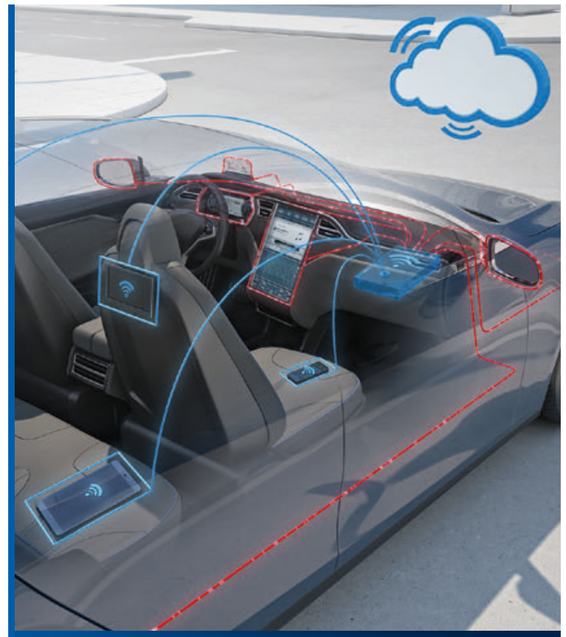
### Echtzeitkommunikation

- Time Sensitive Networking (TSN)
- Konvergente Netze
- Drahtloskommunikation
- Open-Source-Stacks
- Hardwareimplementierungen
- Feldbusse
- Interoperabilität und Testing

### Steuerungshardware & Architekturkonzepte

- CPU- und Embedded-Plattformen
- Offene Steuer- und Regelplattformen
- Anwendung von FPGA-Technik
- Sensordatenerfassung und -aufbereitung
- Regelkonzepte für Servoantriebe und Sonderanwendungen
- Leistungselektronik und Umrichtertechnik

**Kontakt:**
Dipl.-Ing. Florian Frick
florian.frick@isw.uni-stuttgart.de



AUTOMOTIVE

# Steckverbinder

Rosenberger steht für innovative Steckverbinder-Systeme, die in modernen Fahrzeugen unverzichtbar sind – heute und in Zukunft:

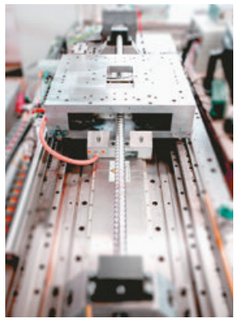
Ob FAKRA- oder High-Speed-FAKRA-Mini-Steckverbinder, High-Power- oder High-Speed-Daten-Steckverbinder, Hochvolt- oder Magnetsteckverbinder – Qualität und Zuverlässigkeit unserer Automotive-Systeme sind konzipiert für vielfältige Anwendungen:

- Fahrerassistenzsysteme
- Autonomes Fahren
- Navigation und Telematik
- Infotainment und Fond-Entertainment
- Internet und Mobilkommunikation
- Batterielade-Applikationen und Stromversorgung in Elektro- und Hybridfahrzeugen.

**www.rosenberger.com**

Rosenberger

## GRUPPE 4: ANTRIEBSSYSTEME UND -REGELUNG



**Forschungsschwerpunkte:**

### Antriebsregelung

- Systemdynamik geregelter Antriebssysteme
- Alternative und erweiterte Regelungsstrukturen
- Modellbasierte und lernende Kompensationsverfahren zur Steigerung der Genauigkeit

### Maschinentechnik

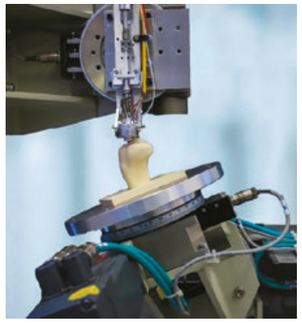
- Konstruktive Optimierung von Antriebssystem-komponenten
- Entwicklung und Erprobung neuartiger Antriebssysteme
- Optimierte Verwendung zusätzlicher Sensorik sowie Aktorik

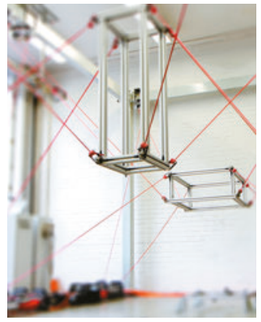
### Industrierobotik

- Posenabhängige Systemdynamik und modellbasierte, adaptive Regelungsverfahren
- Hybride (Additiv & Subtraktiv) Bearbeitung verschiedener Werkstoffe
- Komplexe Handhabung biegeschlaffer Bauteile
- Neuartige Kalibrierverfahren zur Steigerung der dynamischen Bahngenauigkeit

**Kontakt:**
Nico Helfesrieder, M.Sc.
nico.helfesrieder@isw.uni-stuttgart.de

## GRUPPE 5: MECHATRONISCHE SYSTEME UND PROZESSE





**Forschungsschwerpunkte:**

### Dynamik mechatronischer Systeme

- Optimierung und Neuentwicklung mechatronischer Systeme sowie moderner Softwareapplikationen
- Modellierung, Simulation und Systemidentifikation
- Methoden zur Datenerfassung und -auswertung für die Optimierung von ein- und mehrstufigen Produktionssystemen und Wertschöpfungsketten
- Flexible Prozessplanung zur Kompensation fehlerhafter Bauteile während des Fertigungsablaufs
- Autonomes verlegen von Kabelsträngen für den Mobilitätssektor

### Additive Fertigung

- Freiformdrucken vom CAD-Modell bis zum Produkt
- Entwicklung hochfrequenter Regelungs- und Steuerungstechnik
- Modellierung und Simulation additiver Fertigungsprozesse
- Spezialanwendungen: von der Medizintechnik bis hin zum Bauwesen unter Verwendung verschiedenster Technologien

### Seilrobotik

- Rekonfiguration veränderlicher Roboterkinematiken
- Erweiterung des Einsatzgebietes durch Erforschung neuer Roboterkinematiken
- Spezialanwendungen: z.B. Additive Fertigung

**Kontakt:**
Colin Reiff, M.Sc.
colin.reiff@isw.uni-stuttgart.de

## GRUPPE 6: VIRTUELLE METHODEN IN DER PRODUKTIONSTECHNIK

**Forschungsschwerpunkte:**

### Digitaler Zwilling – auf dem Weg zum vollständig digitalen Lebenszyklus der Produktion

- Hochgenaue Simulation und Kopplung mit der realen Produktion
- Prozess-, Maschinen-, Anlagen- und Datenmodelle in mehreren Zeitebenen und Skalierungen
- Ziel: Lebenszyklus der Produktion digital begleiten

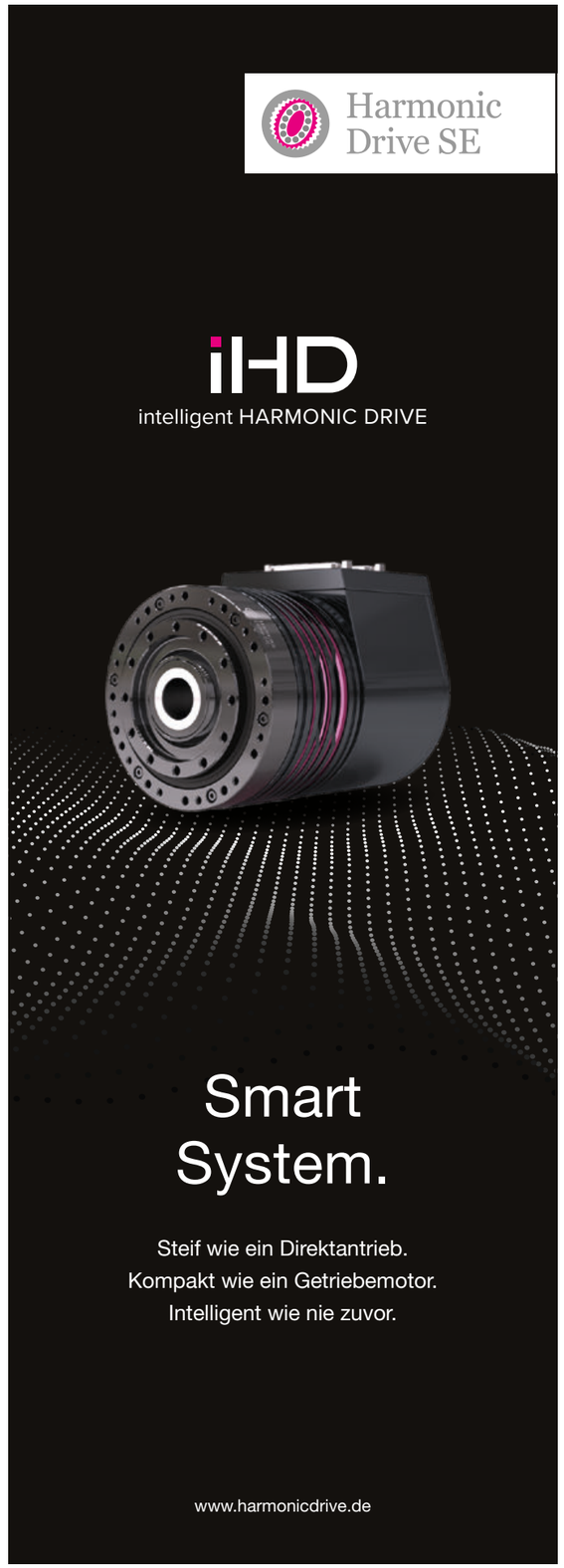
### Digitales Engineering – virtuelle Methoden und Werkzeuge für ein effizienteres Engineering

- Weiterführende Methoden für die Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)
- Digitale Methoden und Werkzeuge automatisieren das Engineering
- Ziel: Engineering für den digitalen Zwilling schaffen

### Maschinelles Lernen und digitaler Zwilling – intelligente Methoden für das Engineering der Zukunft

- Konzepte für eine lernende Steuerung der Produktion
- VIBN Simulation als Trainingsumgebung für Reinforcement Learning
- Lernende Simulatoren
- Ziel: Intelligente Produktionssysteme und optimierte Simulationsmodelle

**Kontakt:**
Florian Jaensch, M.Sc.
florian.jaensch@isw.uni-stuttgart.de



Erscheinung
1x jährlich

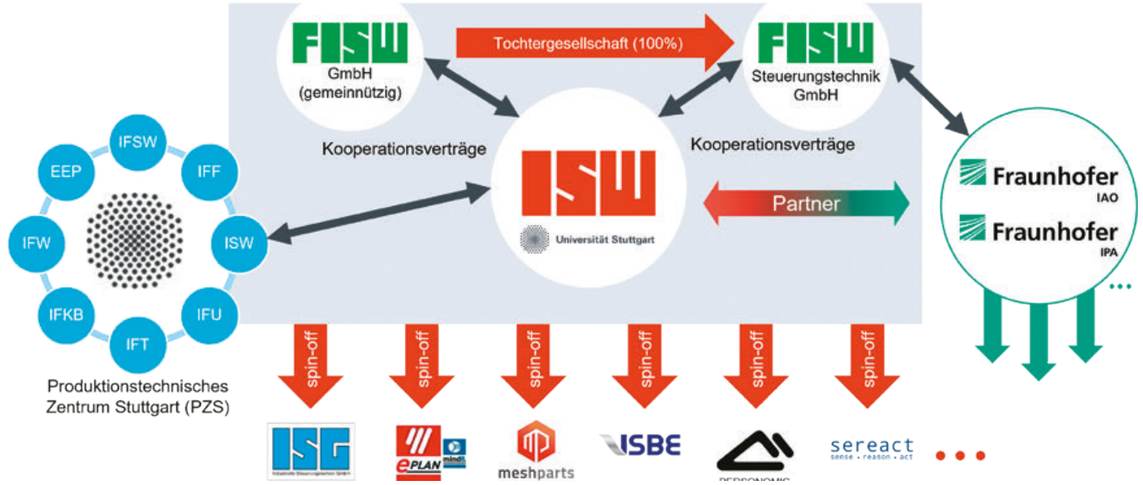
## INGENIE
## DAS KARRIEREMAGAZIN FÜR FRAUEN

**Ein Kooperationsprojekt der Informationszentrale des Instituts für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV) mit der ALPHA Informationsgesellschaft mbH**

**Informationen erhalten Sie unter:**
**www.institut-wv.de**
**www.alphapublic.de**

**Bestellungen kostenfrei**
per E-Mail: info@institut-wv.de,
Tel.: 06206 939-0 oder an
ALPHA Informationsgesellschaft mbH,
Finkenstraße 10, 68623 Lampertheim
– mit Angabe Ihrer Adresse möglich.

## PARTNERINSTITUTE




Das ISW finanziert seine Forschungsarbeiten über unterschiedliche Forschungsträger wie z.B. DFG, BMBF, BMWK und bearbeitet industrieorientierte Entwicklungen in enger Kooperation mit den FISWs.
Die notwendigen Mittel für die wissenschaftlichen Mitarbeiter und die Angestellten in den Bereichen Technik und Verwaltung werden durch Haushaltsmittel der Universität, öffentlich geförderte Grundlagenforschung, industrielle Gemeinschaftsforschung und direkte Aufträge aus der Industrie gedeckt.

Das ISW verfügt über ein umfangreiches internationales Netzwerk in der Wissenschaft und Industrie. Auch in vielen nationalen und internationalen Gremien ist das ISW ein anerkannter und aktiver Partner.
Im näheren lokalen Umfeld besteht eine enge technische Zusammenarbeit mit den prozessorientierten Instituten des Produktionstechnischen Zentrums Stuttgart (PZS) und auf der Anwendungsseite mit Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft am Standort Stuttgart. Insbesondere durch die Personalunion von Herrn Prof. Riedel als Institutsleiter des Fraunhofer Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation ergeben sich sehr gute Synergien bei der Bearbeitung komplexer Projekte im Umfeld der Kopplung von Produktentstehung und Produktionsprozessen.
Aufgrund der industrienahen Forschung mit Praxisrelevanz wurden über die Jahre hinweg unterschiedliche Firmen entsprechend der Forschungsfelder des ISW erfolgreich ausgegründet. Zu den Spin-offs besteht nach wie vor ein sehr enger Kontakt. Über die Zusammenarbeit mit den beiden FISWs werden sehr kompetente und passende Lösungen für die Industrie erarbeitet und erfolgreich umgesetzt.

# FORSCHUNGSPROJEKTE

## INTEGRATIVE COMPUTATIONAL DESIGN AND CONSTRUCTION FOR ARCHITECTURE (IntCDC)

IntCDC
CLUSTER OF EXCELLENCE

**EIN EXZELLENZCLUSTER GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)**

DFG

**Das Exzellenzcluster IntCDC ist ein interdisziplinäres Forschungsprojekt in Stuttgart mit dem Fokus der wirtschaftsnahen Grundlagenforschung im Bereich der Architektur und Baufertigung. Seit 2019 läuft die erste siebenjährige Förderperiode des Exzellenzclusters als eines der bedeutendsten und umfangreichsten Förderprojekte der DFG.**

ABB.1: Das Bauen der Zukunft - Vision, © IntCDC, University of Stuttgart.

Das Baugewerbe steht vor großen Herausforderungen. Zu den vorherrschenden Problemen gehören Arbeitskräftemangel, geringe Produktivität, hoher Ressourcenbedarf, starke Umweltauswirkungen sowie die schleppende Einführung neuer Technologien. Im Exzellenzcluster IntCDC forscht die Universität Stuttgart an der Lösung dieser Probleme und macht das Baugewerbe bereit für die Zukunft.
Das Exzellenzcluster „Integrative Computational Design and Construction for Architecture“ (IntCDC) betreibt integrative Grundlagenforschung zu Technologien für das Bauen der Zukunft. Ziel ist es, das volle Potenzial digitaler Technologien zu nutzen, um Design, Fertigung und Konstruktion auf der Grundlage von Integration und Interdisziplinarität neu zu denken.
Das interdisziplinäre, groß angelegte Forschungsvorhaben will wegweisende Innovationen im Bausektor ermöglichen. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Entwicklung neuer Ansätze und Methoden für einen nachhaltigen, effizienten und innovativen Gebäudeentwurf und -bau mit besonderem Augenmerk auf den Holzbau, Faserleichtbau, Betonbau, und dem Einsatz digitaler Technologien.
Durch den systematischen, ganzheitlichen und integrativen computerbasierten Ansatz sollen die methodischen Grundlagen für eine umfassende Modernisierung des Bauschaffens gelegt werden.
Eine Schlüsselkomponente des IntCDC-Forschungsansatzes, welche die Integration von computerbasiertem Entwurf, Engineering und Fertigung für nachhaltige und innovative Gebäudelösungen ermöglicht ist Co-Design.
Co-Design ist ein gemeinschaftlicher und integrierter Planungsansatz, der alle am Bauprozess Beteiligten wie Architekten und Ingenieure parallel einbezieht und darauf abzielt, die Leistungsfähigkeit, die Nachhaltigkeit und den Entstehungsprozess von Gebäuden zu optimieren, indem verschiedene Entwurfskriterien und Bedingungen, wie z.B. strukturelle, ökologische, wirtschaftliche und soziale Faktoren berücksichtigt werden (siehe **ABB. 2**).
Das Projekt IntCDC basiert auf interdisziplinärer Forschung zwischen den Bereichen Architektur, Bauingenieurwesen, Ingenieurgeodäsie, Produktions- und Systemtechnik, Informatik und Robotik sowie Geistes- und Sozialwissenschaften
IntCDC hat die erste Projektphase (01.07.2019 - 31.06.2022) erfolgreich abgeschlossen und befindet sich derzeit in der zweiten Projektphase, die noch bis Mitte 2025 läuft.

Nach den erfolgreichen Teilprojekten (TP) 4, 9, 14 und 15 der ersten Projektphase, ist das **ISW** aktuell an den **Teilprojekten 4-2**, **14-2** und **27** beteiligt, die im Folgenden präsentiert werden.

**Ausblick**
Als Demonstrator für die Leistungsfähigkeit der entwickelten Methoden und Systeme wird das Exzellenzcluster ab dem Jahr 2024 mit dem Bau des „Large Construction Robotics Laboratory“ (LCRL) auf dem Campus in Stuttgart-Vaihingen beginnen. Das neue Gebäude des IntCDC basiert auf den entwickelten Planungsmethoden und dem neuartigen Bausystem. Die Bauteile des Gebäudes werden mit der entwickelten Roboteranlage gefertigt. Nach der Fertigstellung werden die Roboter aus dem provisorischen Labor in Waiblingen in das neue Zuhause des IntCDC umziehen.

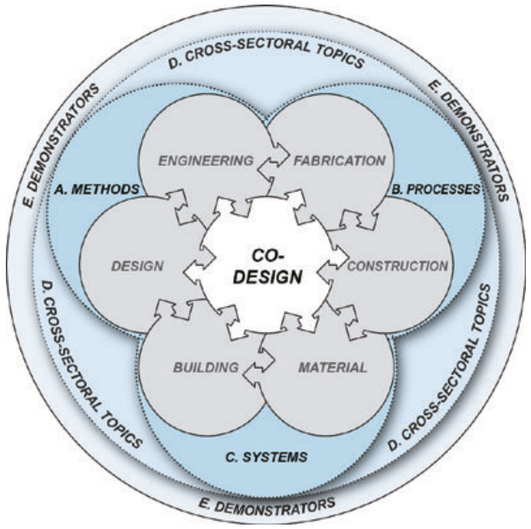



ABB.2: Co-Design Philosophie, © IntCDC, University of Stuttgart.

**Kontakt:**
Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl
alexander.verl@isw.uni-stuttgart.de





STUTTGARTER INNOVATIONSTAGE

**TRENDS UND INNOVATIONEN RUND UM DAS THEMA STEUERUNGSTECHNIK UND DIGITALISIERUNG**

Die hohe Skalierbarkeit und der Ressourcenreichtum von Cloud-Plattformen sollen auch für die Steuerungstechnik nutzbar gemacht werden. Dieser Gedanke war 2017 Grundlage der ersten Veranstaltung „Stuttgarter Innovationstage – Steuerungstechnik aus der Cloud“. Inzwischen wird die Veranstaltung jährlich durchgeführt und informiert über die aktuellen Trends und Innovationen rund um das Thema Steuerungstechnik und Digitalisierung.

Weitere Informationen zur nächsten Veranstaltung finden Sie unter:

**www.stuttgarter-innovationstage.de**

ORGANISATION ISW VERANSTALTER FISW

# ENTWICKLUNG EINER MODULAREN FERTIGUNGSPLATTFORM FÜR DIE HERSTELLUNG VON HOLZBAUTEILEN (IntCDC TP4-2)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**Dieses Teilprojekt von IntCDC baut auf den Ergebnissen von TP4 der ersten Projektphase auf und erweitert die rekonfigurierbare Fertigungsplattform. Der Schwerpunkt der zweiten Projektphase liegt auf der weiteren Erhöhung der Flexibilität der entwickelten Fertigungsplattform und deren Integration in den Co-Design-Prozess. Die entwickelten Methoden und Systeme werden anhand der Anwendung beim Bau des neuen LCRL demonstriert.**

In diesem Projekt arbeitet das ISW mit den Partnern vom Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD) sowie dem Institut für Visualisierung und Interaktive Systeme (VISUS) zusammen.
In Teilprojekt 4 wurde in der ersten Projektphase eine neuartige Roboterplattform für die Vorfertigung von Holzbauteilen entwickelt.
Der Grundgedanke hinter dem Konzept ist es, ein modulares, rekonfigurierbares Fertigungssystem zu entwickeln, das entweder direkt auf der Baustelle oder bei lokal ansässigen Holzbauunternehmen für die Durchführung eines spezifischen Projekts aufgestellt wird (**ABB. 1**).

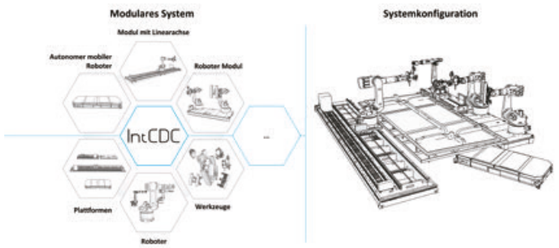



ABB.1: Modulares System.

Das Fertigungssystem kann so für jedes Projekt an die spezifischen Anforderungen und Randbedingungen rekonfiguriert werden. Um dies möglich zu machen, sind die Industrieroboter auf Containern nach ISO-668 montiert. Somit können die einzelnen Module des Systems wie herkömmliche Frachtcontainer transportiert, schnell aufgebaut und integriert werden.
Aktuell besteht das modulare Vorfertigungssystem aus 4 Containerplattformen mit Kuka KR420 bzw. Kuka KR210 Industrieroboter. Die Container haben eine Größe von 40 und 20 Fuß und verfügen über Linearachsen mit 10,5 bzw. 4,56 Metern Verfahrweg (**ABB. 2**).
Dieses Konzept ermöglicht es flexibel mehrere Zellen aus

ABB.2: Rekonfigurierbares Fertigungssystem.

diesen Modulen aufzubauen. Nach dem Aufstellen müssen die einzelnen Container nur mit Strom und Druckluft versorgt werden und sind daraufhin direkt betriebsbereit.
In der ersten Projektphase lagen die Schwerpunkte des ISWs auf der Entwicklung eines geeigneten, rekonfigurierbaren Steuerungssystems, dass sich an die Konfiguration des Fertigungssystem anpasst. Ein Task-Skill basierter Aufgabengraph bildet hierbei die Schnittstelle zwischen robotischer Fertigung und computergestütztem Entwurfsprozess.

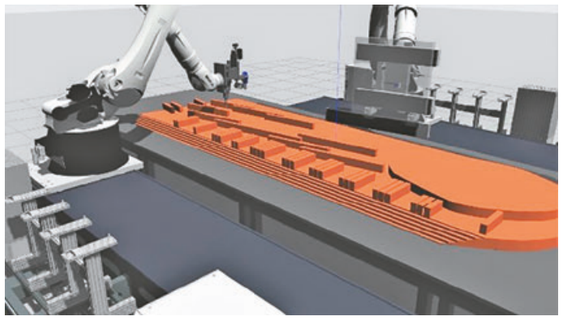


ABB.3: Simulationsmodell des Fertigungssystems und des Bauteils.





In der zweiten Projektphase wird die bestehende Anlage um ein neues schwerlast AMR für das Bauteilhandling erweitert, das nun auch die zellenübergreifende Logistik und Fertigung sowie die Vergrößerung des Arbeitsraums einzelner Zellen ermöglicht. Darüber hinaus soll die Steuerung und rekonfigurierbare Fertigungsanlage in den Co-Design-Entwurf integriert werden.
Zur Sicherstellung der Fertigbarkeit während des Co-Design-Entwurfs wird die Fertigung der Gebäudeelemente aus dem Entwurfsprozess simuliert (**ABB. 3**).
Dabei werden sowohl die Steuerungskonfiguration als auch das Simulationsmodell modellbasiert generiert. Um eine Integration im Sinne des Co-Designs zu ermöglichen, wird eine Schnittstelle zwischen dem Entwurfsmodell und der Steuerung und Simulation geschaffen (**ABB. 4**). Dies ermöglicht die automatisierte Simulation vieler Varianten und bildet damit die Grundlage für die Optimierung im Co-Design.

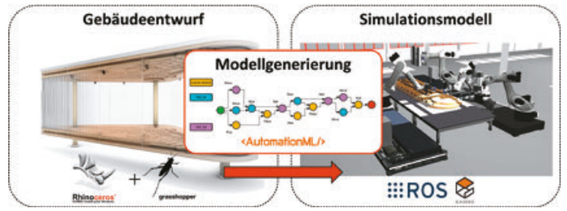



ABB.4: Schnittstelle zwischen Entwurfs- und Simulationsmodell für die Modellgenerierung.

**Kontakt:**
Benjamin Kaiser, M.Sc.
benjamin.kaiser@isw.uni-stuttgart.de

# ERWEITERUNG DER CYBER-PHYSIKALISCHEN VORFERTIGUNGSPLATTFORM ZUR ZUVERLÄSSIGEN HERSTELLUNG VON GROSSFLÄCHIGEN FASERVERBUNDBAUELEMENTEN MIT KONVENTIONELLEN UND ALTERNATIVEN MATERIALSYSTEMEN (IntCDC TP14-2)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**In diesem Teilprojekt wird die in der ersten Phase entwickelte off-site Fertigungsplattform für Faserverbundbauteile erweitert. Das Ziel ist eine flexiblere, ressourceneffiziente und nachhaltige Produktion für architektonische Gebäudeteile zu ermöglichen.**

Im IntCDC Forschungsnetzwerk 2 für „weitspannende Gebäude“ wird ein Verfahren erforscht, welches ermöglichen soll, große und belastbare Tragwerke aus faserverstärkten Kunststoffen herzustellen. Dazu sollen, abseits der Baustelle, kleinere individuelle Module aus Faserverbundwerkstoffen gefertigt werden, die dann vor Ort zu einem großen Bauwerk verbunden werden.
Der Fokus des Teilprojekts 14 liegt hierbei auf der Entwicklung einer Fertigungsplattform für die im Forschungsnetzwerk entworfenen Module. Das Forschungsprojekt ist daher als eine Kooperation von Fasertechnikern (Institut für Flugzeugbau), Architekten (Institut für Computational Design and Construction) und den Automatisierungstechnikern vom ISW ausgelegt.
Im TP14-2 wird das bestehende Fertigungssystem aus zwei kollaborierenden Robotern um ein fahrerloses Transportsystem ergänzt. Durch den Zugewinn an Freiheitsgraden mit der Bewegung der Werkstückaufspannung, sollen neue Dimensionen von Bauelementen gefertigt werden sowie die Gestaltungsfreiheit gesteigert werden. Ein weiteres Ziel dieser Projektphase ist es den Produktionsprozess ressourceneffizienter und nachhaltiger zu gestalten. Eine wesentliche Rolle werden dabei Naturfasern spielen. Durch das inhomogenere Rohmaterial ergeben sich neue Herausforderungen für das Produktionssystem.
Die wesentliche Aufgabe des ISW in diesem Teilprojekt ist die Berechnung und Simulation von Robotertrajektorien aus den vorgegebenen Wickelsyntax des Bauteils. Nur durch eine umfangreiche Vorausberechnung kann sichergestellt werden, dass die komplexen Bauteile überhaupt gefertigt werden können. Des Weiteren wird das für diese Phase neubeschaffte fahrerlose Transportsystem um autonome Fahrfunktionen erweitert und in das bestehende Robotersystem integriert. Ein weiterer Aspekt ist die Kalibrierung der Fertigungsanlage. Durch Mobilität der modularen Bauweise, wird das Produktionssystem in wechselnden Umgebungen betrieben. Deshalb ist eine automatisierte Kalibrierung der Anlage zur schnellen Einsatzfähigkeit notwendig.

ABB.1: Das off-site Fertigungssystem bestehend aus zwei Roboterplattformen, Quelle: Universität Stuttgart, IntCDC.

Im Geiste des im IntCDC vorangetriebenen „Co-Design“ werden dabei wesentliche Erkenntnisse und Aufzeichnungen über den Fertigungsprozess mit den vorgehenden und nachfolgenden Projekten geteilt, um den Gesamtprozess zu optimieren.

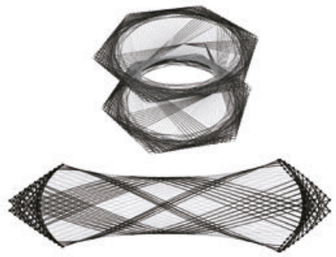


ABB.2: Mögliche Bauteilformen, Quelle: Universität Stuttgart, InctCDC.

**Kontakt:**
Timo König, M.Sc.
timo.koenig@isw.uni-stuttgart.de





# CYBER-PHYSISCHE, GROSSSKALIGE MANIPULATION MIT REKONFIGURIERBAREN SEILROBOTERN FÜR DEN BAU IN BESTEHENDEN STRUKTUREN (IntCDC TP27)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**Das Forschungsprojekt hat das Ziel der Entwicklung einer Methode zur Geometrieplanung eines parallelen Seilroboters für die In-Betrieb-Rekonfiguration. Die Rekonfigurierbarkeit ist hier essentiell, da diese ermöglicht den Seilroboter an eine wechselnde Anforderung anzupassen und somit den Einsatz in einer dynamischen Umgebung, speziell im Baubereich, ermöglicht. Abschließend wird die entwickelte Planungsmethode an einem realen Seilroboter experimentell validiert.**

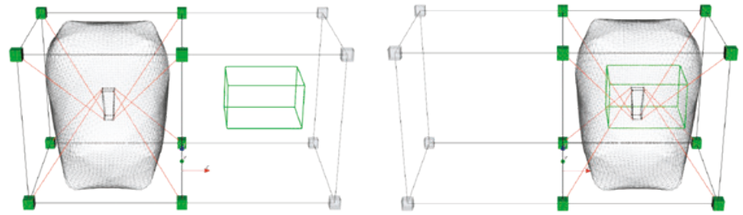


ABB.1: Der Seilroboter mit zugehörigem Arbeitsraum und Anforderung in Ist- und Soll-Konfiguration.

Aufgrund des geringen Gewichts von Seilen als Antriebskomponenten können Seilroboter sehr große Arbeitsräume überspannen oder auch hochdynamische Bewegungen der Roboterplattform realisieren. Beispielhafte Anwendungen, die diese Systemeigenschaften nutzen, sind die Skycam (L.L. Cone, 1985) für Fernsehübertragungen oder für hochdynamische Bewegungssimulation am Max-Planck-Institut in Tübingen (P. Miermeister et al. 2016). Durch die genannten Eigenschaften sind Seilroboter auch interessant für den Einsatz im Bausektor, wie beispielsweise die Anwendungsfälle des Betondruck (M. M. Muniz et al., 2020) oder automatisiertes Mauern (Boumann et al., 2020) zeigen.
Zusätzlich sind Seilroboter als eine der wenigen Systeme wirtschaftlich rekonfigurierbar. Wobei hier Rekonfiguration das Verschieben der Umlenkrollen oder auch das Hinzufügen oder Entfernen von Antriebsseilen bedeutet. Somit kann der Seilroboter durch eine Rekonfiguration an eine Anforderung angepasst werden, was die Flexibilität des Systems enorm erweitert. Um dieses Potential für die Bauindustrie zu erschließen, werden die relevanten Anforderungen wie beispielsweise Arbeitsraum, erforderliche Orientierungen, Nutzlast oder auch Seil-Seil-Kollisionen mit Partnern aus dem Projektnetzwerk festgelegt. Für die Verdeutlichung des Szenarios ist in der linken Abbildung von **Bild 1** die Ausgangssituation und in der rechten Abbildung die gesuchte Konfiguration dargestellt.
Entsprechend zu **Bild 1**, ist ein Kernziel des Projekts die Entwicklung einer Methode, die systematisch auf Basis des Anforderungskörpers und der aktuellen Geometrie ein Seilroboter bestimmt, der die Anforderung bestmöglich erfüllt. Die entwickelte Methode wird anschließend an dem Seilroboter COPacabana am ISW über die Auswertung der Absolut- und Wiederholgenauigkeit, über eine Rekonfiguration hinweg, validiert. Basierend auf den Genauigkeitsmessung soll eine lernende Online-Kalibriermethode entwickelt und untersucht werden, die eine Genauigkeitssteigerung ermöglicht. Abschließend wird die Planungsmethode in einem Datenmodell dem Projektnetzwerk zur Verfügung gestellt, um das Robotersystem in den digitalen Planungsprozess einer Baustelle zu integrieren.

**Kontakt:**
Felix Trautwein, M.Sc.
felix.trautwein@isw.uni-stuttgart.de

# DATEN-INTEGRIERTE SIMULATIONSWISSENSCHAFT (SimTech)

## EIN EXZELLENZCLUSTER GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**Das ISW ist Mitglied des Exzellenzcluster EXC 2075 „Daten-integrierte Simulationswissenschaft (SimTech)“ und leistet maßgebliche Beiträge zur Anwendung der Simulation als Werkzeug in der Produktionstechnik.**

Der Einsatz von Simulationstechnik ermöglicht in der industriellen Praxis die schnelle und effiziente Untersuchung von neuen Maschinen und die Optimierung von bestehenden Anlagen. Längst gehört die Simulation zum Werkzeugkasten der modernen Steuerungstechnik und wird bei der Auslegung, Steuerung- und Regelung von Fertigungsmaschinen und Robotern eingesetzt. Typische Anwendungen der Simulation sind dabei die Optimierung der Leistungsfähigkeit bestehender Produktionsanlagen, der Entwurf neue Roboter sowie die Beschleunigung des Engineering Prozesses rund um die Inbetriebnahme von Werkzeugmaschinen.
Am ISW werden dazu Simulationswerkzeuge für den Einsatz in Echtzeitsteuerungen entwickelt und angewendet. Vor allem mithilfe der Hardware-in-the-Loop werden Komponenten oder gar ganze Maschinen durch Simulation mit einem realistischen Verhalten ersetzt.

Im Rahmen von SimTech wird derzeit ein Forschungsprojekt gefördert, das sich mit der simulationsbasierten Steuerung von Robotern anhand von integrierten Sensordaten beschäftigt und insbesondere den Wissenstransfer von solchen, in SimTech entwickelten, simulationsbasierten Methoden in industrielle Anwendungen adressiert. Darüber hinaus ist das ISW in einer Vielzahl von Forschungsprojekten rund um die Themen Dynamik- und Echtzeitsimulation aktiv.

**Kontakt:**
Prof. Dr.-Ing. O. Riedel
oliver.riedel@isw.uni-stuttgart.de

Prof. Dr.-Ing. A. Verl
alexander.verl@isw.uni-stuttgart.de

Foto: Ludmilla Parsyak, ISW Uni Stuttgart

FISW Steuerungstechnik GmbH
www.fisw.de

ÜBER DIE GRENZEN DES MÖGLICHEN

Mit unserem Leistungsangebot zur „Steuerungs- und Antriebstechnik“ unterstützen wir Sie bei der Verfolgung der wesentlichen Produktionsziele im Bereich Automatisierungstechnik. Zur Bewältigung Ihrer Herausforderungen bieten wir Ihnen folgende Leistungen:

- Consulting
- Konzeption
- Prototypen
- Produktentwicklung
- Optimierung
- Schulungskonzepte

In den Bereichen:

- Automatisierungssysteme und Sondermaschinen
- Steuerungs- und Regelungstechnik
- (Echtzeit-) Kommunikation
- Antriebs- und Maschinentechnik
- (Echtzeit-) Simulation
- Software- und Engineeringsysteme
- Informations- und Datenmodelle

Dr.-Ing. Armin Lechler
FISW Steuerungstechnik GmbH
Kriegsbergstraße 34
70174 Stuttgart
armin.lechler@fisw.de

Wir freuen uns darauf, zukünftige Herausforderungen zusammen mit Ihnen zu meistern.
Nehmen Sie Kontakt mit uns auf!





# WISSENSTRANSFER ZWISCHEN FORSCHUNG UND INDUSTRIE ZUR INDUSTRIELLEN ANWENDUNG VON LERNEN UND ECHTZEIT-SIMULATION (DataCon)

## GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**In diesem Forschungsprojekt wird der Transfer von neuen Methoden des Exzellenzclusters 2075 „Daten-integrierte Simulationswissenschaften“ (SimTech) in die Industrie adressiert. Um den Transfer von wissenschaftlichen Erkenntnissen in die industrielle Anwendung zu schaffen, wird anhand des industriellen Anwendungsfalls der Leitungssatzmontage gezeigt, wie Methoden des maschinellen Lernens mit daten-integrierten Simulationsmethoden kombiniert werden können, um diese zur Steuerung und Regelung des Prozesses zu nutzen.**

**Motivation**
Um Wissen aus der Forschung in die Industrie zu transferieren, müssen Bedürfnisse aus der Industrie mit neuen Ansätzen und Technologien aus der Forschung verbunden werden. Vor dem Hintergrund des zunehmenden wirtschaftlichen Drucks auf die Automobilindustrie in Deutschland sind Prozesse wie die Kabelbaumfertigung und -montage, welche einen hohen Anteil an manuellen Fertigungsschritten beinhalten, nicht konkurrenzfähig mit der Fertigung in Niedriglohnländern. Um den Automobilstandort Deutschland auch in Zukunft wettbewerbsfähig zu halten, ist daher eine Erhöhung des Automatisierungsgrades unbedingt erforderlich.

**Zielsetzung**
Im Rahmen des Projektes soll ein Demonstrator aufgebaut werden, welcher das Potenzial von Methoden des maschinellen Lernens und datenintegrierter Simulation zur Lösung komplexer industrieller Produktionsprozesse, wie der Kabelbaummontage, aufzeigt. Dafür wird die in **ABB. 1** dargestellte simulationsbasierte Robotersteuerung entwickelt. Sinn und Zweck des Demonstrators ist es, Unternehmen auf aktuelle Forschungsthemen im EXC 2075 aufmerksam zu machen, wissenschaftliche Erkenntnisse zu verbreiten und Erfahrungen auf dem Gebiet der Simulationstechnik auszutauschen. Darüber hinaus, zielt das Projekt darauf ab die Sichtbarkeit von SimTech in der Industrie zu erhöhen. Dafür unterstützt das Projekt den Ausschuss für Wissenstransfer und das Industriekonsortium SimTech (IC SimTech) bei der Ausrichtung von Veranstaltungen und Organisation von gemeinsamen Treffen und Events mit industriellen Partnern.

**Lösungsansatz**
Der Leitungssatz ist eine der aufwändigsten Komponenten im Automobilbau. Er besteht, wie in **ABB. 2** dargestellt, aus

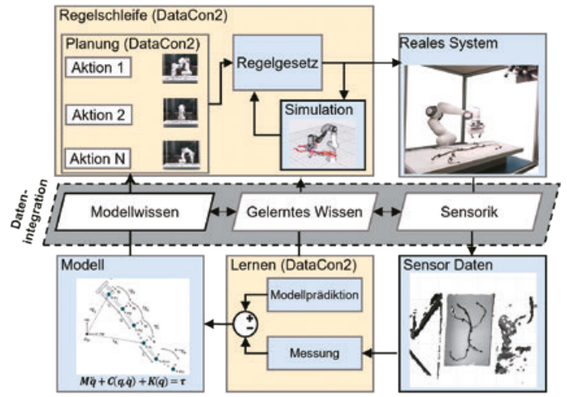



ABB.1: Übersicht des geplanten Demonstrators.

einer Vielzahl von Bauteilen mit einer hohen Variantenvielfalt, die durch biegeschlaffe Leitungen miteinander verbunden sind. Dies stellt hohe Anforderungen an jeden Automatisierungsansatz.
Um die vielschichtige Problematik systematisch anzugehen, wurden im Forschungsprojekt strategische Partnerschaften zu führenden Automobilfirmen über den Forschungscampus Arena 2036 aufgebaut. In enger Abstimmung mit den industriellen Partnern wurden Anforderungen an die Automatisierung einer industriellen Leitungssatzmontage abgesteckt. Basierend auf diesen Anforderungen wurde ein Referenzszenario für die automatisierte Montage erarbeitetet und ein Demonstrator zur automatisierten Kabelbaummontage aufgebaut.

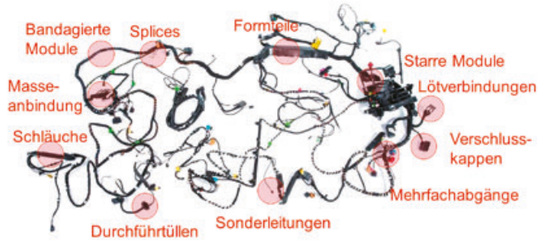



ABB.2: Hauptleitungssatz eines Fahrzeugs.

Das System besteht aus einem Roboterarm zur Manipulation des Leitungssatz, einem 3D Stereokamerasystem zur Erfassung der aktuellen Position und Lage der Leitungssatzkomponenten, sowie einer Dynamiksimulation zur Abbildung des biegeschlaffen Materialverhaltens. Zur Simulation wird der Kabelbaum durch eine lokale Diskretisierung in finite Segmenten in eine niedrigdimensionale Darstellung überführt. Diese erlaubt es Konfigurationsänderungen des Leitungssatzes mit vergleichsweise geringen Berechnungszeiten zu simulieren. Das Simulationsmodell wird dabei kontinuierlich über Punktewolkedaten des Kamerasystems der realen Konfiguration des Leitungssatzes nachgeführt. Für das Zusammenführen von Simulation und Sensordaten, wird dabei auf Methoden zur Dimensionsreduktion (Locally Linear Embeddings), Kompetitives Lernen (Self Organizing Maps) und Inferenzschätzung (Gaussian Mixture Model) zurückgegriffen. Dadurch sind Position und Lagedaten der einzelnen Leitungssatzkomponenten jederzeit bekannt und können zur Griffpunktbestimmung und Trajektoriengenerierung von der Robotersteuerung abgerufen werden. So lassen sich im in **ABB. 3** abgebildeten Demonstrator einfache Montageaufgaben wie das Montieren in vorgesehene Halterungen oder das befestigen von Halteclips zur Fixierung des Leitungssatzes in einer Karosse bereits automatisieren.

**Zusammenfassung und Ausblick**

Ziel des Projekts ist der Wissenstransfer von Ansätzen datenintegrierter Simulation und maschinellem Lernen von der Forschung in die Industrie. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Projekts ein Demonstrator zur automatisierten Handhabung von Leitungssätzen aufgebaut.
Offene Herausforderungen liegen noch darin, ausreichende Prozesssicherheiten und Verarbeitungsgeschwindigkeiten für die industrielle Anwendung sicherzustellen. Dies betrifft sowohl die Bildverarbeitung, als auch die Planung und Steuerung der Handhabungsprozesse. Im Rahmen der Projektfortsetzung (DataCon2) soll daher untersucht werden, wie sowohl Simulation, als auch aufgezeichnete Daten genutzt werden können, um diesen Herausforderungen zu begegnen.

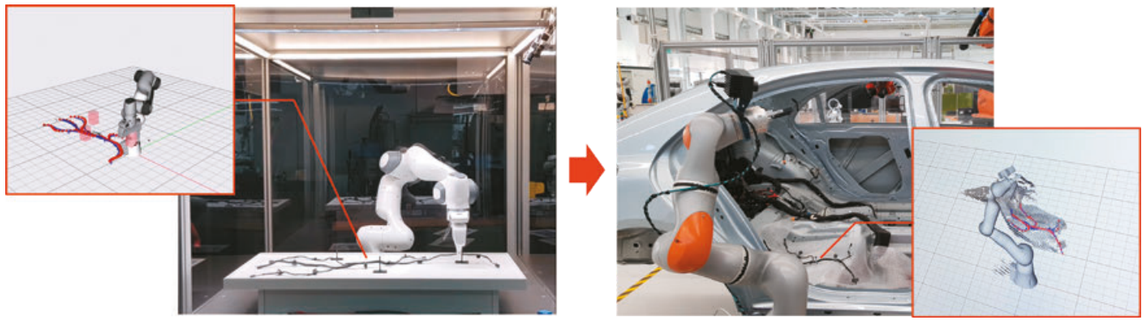


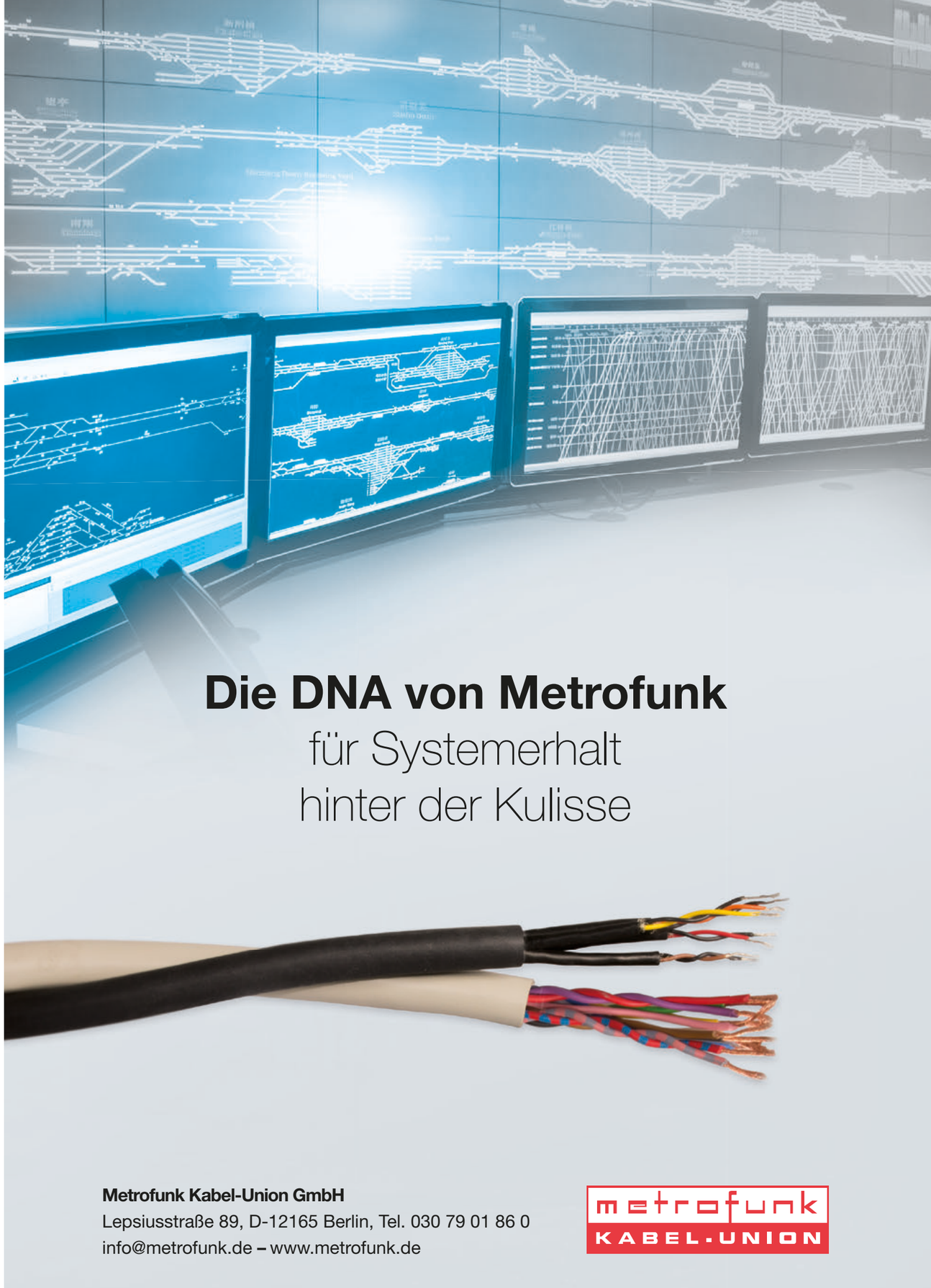
ABB.3: Demonstrator bei der automatisierten Montage eines Leitungssatzes in vorgesehene Halterungen (links); Transfer der entwickelten Lösung auf das Referenzszenario zur automatisierten Montage eines Leitungssatzes im Fahrzeug (rechts).

**Projektpartner:**

BOSCH HOMAG Informatik Forum Stuttgart INTES ISG MAHLE MANN+HUMMEL SIEMENS TECOSIM

**Kontakt:**
Lukas Zeh
lukas.zeh@isw.uni-stuttgart.de





# GRADUATE SCHOOL OF EXCELLENCE ADVANCED MANUFACTURING ENGINEERING (GSaME)

## GEFÖRDERT DURCH DAS MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST BADEN-WÜRTTEMBERG

**Das ISW beteiligt sich an den Forschungsarbeiten der verschiedenen Cluster der Graduate School of Excellence Advanced Manufacturing Engineering (GSaME) der Universität Stuttgart. Prof. Riedel und Prof. Verl ergänzen hervorragend das Forschungsprogramm als Wissenschaftliche Mitglieder der GsaME in den Forschungsgebieten: Technologien für die Produktion und Automatisierung, Produktionstechnische Informationstechnologien und Mechatronik, Steuerungstechnik sowie Antriebs- und Maschinentechnik.**

ABB.1: GSaME Jahrestagung © GSaME, Fotograf: Clemens Hess.

Zukünftige Spitzenkräfte müssen neben ausgeprägter Fachkompetenz und fachübergreifendem Wissen auch über Fähigkeiten zur systematischen Weiterentwicklung und Anwendung von Problemlösungs-, Entscheidungs- und Handlungskompetenzen verfügen. Sie müssen offen gegenüber neuen Ideen oder Lösungen sein. Die „Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME)“ bildet im Rahmen eines spezifisch entwickelten kooperativen, sowie interdisziplinären Promotionsprogramms High Potentials aus. Das Ziel der Graduiertenschule besteht darin, optimale Voraussetzungen für Promotionen zum Dr.-Ing. und zum Dr. rer. pol. zu schaffen und wissenschaftlich qualifizierten Nachwuchs durch ein anspruchsvolles Promotionsprogramm (DPP) zu fördern.
Neben der originären wissenschaftlichen Arbeit soll eine ergänzende methodische, inhaltlich-fachliche und außerfachliche Qualifizierung ermöglicht werden und durch verbindliche, transparente sowie angemessene Betreuungsstrukturen das Erreichen der Forschungs- und Qualifizierungsziele innerhalb einer Promotionsdauer von vier Jahren gefördert werden.

Im Jahr 2007 gestartet, ist die GSaME heute ein Erfolgsmodell. Dies zeigen unter anderem die Kooperationen mit mehr als zwanzig namhaften Firmen des Maschinenbaus, der Elektrotechnik oder des Automobilsektors sowie weiteren Forschungspartnern. Mitte Juni 2012 wurde die weitere Förderung der GSaME im Rahmen der Exzellenzinitiative von Bund und Ländern bis 2019 gewonnen und wird darüber hinaus nun durch Industriepromotionen fortgeführt.
Viele Forschungsthemen werden an der GSaME in Projektform umgesetzt. Und begleitet durch Promotionen, finanziert von der DFG oder einem der Kooperationspartner. Dabei wurden strategische Kooperationen mit mehr als 25 Partnern etabliert, aus welchen innovative Demonstratoren, drei geförderte Nachwuchsgruppen sowie internationale Partnerschaften mit z.B. China gepflegt werden. Durch den Aufbau des Promotionsprogramms sammeln die Promovierten wichtige Erfahrungen für einen erfolgreichen Berufsweg und sind den anspruchsvollen Aufgaben der Wirtschaft und Wissenschaft gewachsen.





Produktionssysteme, die schnell und wirtschaftlich auf sich verändernde Anforderungen reagieren können, basieren auf intelligenten/wissensverarbeitenden, flexiblen und rekonfigurierbaren Produktionseinrichtungen.
Momentan promovieren sieben Doktoranden:innen der GSaME mit Prof. Riedel oder Prof. Verl als Erst- oder Zweitbetreuer. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick ausgewählter Arbeiten gegeben.

**Strljic, Daniella**
**Automatisiertes Engineering vollautomatisierter Montagelinien mittlerer Losgröße und erhöhten Flexibilitätsanforderungen durch Einsatz des digitalen Zwillings**
Im Bereich der Montage hat die steigende Nachfrage nach individualisierten Produkten zu einer erhöhten Flexibilität und Anpassungsfähigkeit von Montagesystemen geführt. Die manuelle Ressourcenauswahl in heterogenen Anlagen stellt jedoch eine komplexe Herausforderung dar und bestehende Automatisierungsverfahren sind häufig auf spezifische Maschinentypen beschränkt. Eine mögliche Lösung für die Herausforderungen der Montageplanung ist die Verwendung eines graphbasierten Modells und einer domänenspezifischen Sprache zur Beschreibung von Montageprodukten, -prozessen und -fähigkeiten. Hierbei werden Montagemerkmale verwendet, um die automatische Identifikation der Produktstruktur und die Ableitung der erforderlichen Montageprozesse zu ermöglichen. Gekoppelte Prozess- und Fähigkeitsmodelle ermöglichen einen flexiblen automatisierten Abgleich zwischen beiden. Durch die Simulation von Anlagen und deren digitalen Zwillingen kann die Ressourcenauswahl automatisiert werden.

**Marinescu, Sergiu-Cosmin**
**Methodology for fully Automated Data Acquisition Process Implementation towards Resilient Digital Twins**
In der Smart Factory sind die Arbeitsstationen autonom und modular, so dass sie unabhängig voneinander arbeiten können und flexibel hinzugefügt, entfernt oder umkonfiguriert werden können ohne die Produktion zu unterbrechen. Dies erfordert eine flexible Intralogistik, die dynamisch optimiert werden kann, um den sich ändernden Anforderungen an den Material- und Palettentransport gerecht zu werden. Fahrerlose Transportsysteme (FTS) werden als wichtige Voraussetzung für eine flexible Logistik auf Betriebsebene angesehen, jedoch wird das Batteriemanagement oft vernachlässigt und die Integration mit Echtzeit-Fertigungsbetriebsinformationssystemen ist häufig schlecht. Das Batteriemanagement ist eine wichtige Herausforderung, da es die Produktionsflexibilität beeinträchtigen kann.

**Rusu Claudiu**
**Methodik zur Kopplung von digitalen Mensch und Exoskelettmodellen zur Realisierung des hybriden digitalen Zwillings Mensch-Exoskelett**
Während sich tragbare Roboter am Arbeitsplatz als Präventivmaßnahme für berufsbedingte Muskel-Skelett-Erkrankungen durchsetzen, ist die Entwicklung von Beurteilungsmethoden für die Integration und Bewertung von entscheidender Bedeutung für den Einsatz der Technologie. Die gängigen Methoden sind zum einen der biomechanische Ansatz, bei welchem mathematische Modelle zur Untersuchung der Kräfte, Bewegungen und Dynamik der Mensch-Roboter-Interaktion verwendet werden. Bei dem ergonomischen Ansatz, wird diese Interaktion mit Hilfe von Screening-Tools (z.B. RULA) und qualitativer Forschung (z.B. Fragebögen) untersucht. Diese Werkzeuge definieren die Interaktion, sind aber unzureichend in Bezug auf Fehlausrichtungen der Mensch-Roboter-Interaktion. Hier wird eine auf Key Performance Indicators (KPI) basierende Methodik für die Interaktion zwischen Exoskelett und Mensch-Maschine-Schnittstelle notwendig.

**Gulde, Ralf**
**Künstliche Intelligenz in der Automatisierungstechnik**
Die industrielle Produktion entwickelt sich mit zunehmender Nachfrage nach kundenspezifischen Produkten und komplexen Montageaufgaben weiter. Ziel dieser Forschung ist die Entwicklung eines flexiblen Robotersystems für die Montage von Produkten in kleinen Losgrößen und Stückzahlen. Der Schwerpunkt liegt auf der autonomen Robotermanipulation, so dass eine umfangreiche Programmierung nicht erforderlich ist. Eine umfassende Architektur ermöglicht ein simulationsbasiertes Training und den Einsatz von universellen Robotermanipulationsfähigkeiten auf verschiedenen Roboter systemen. Eine probabilistische Computer-Vision-Pipeline versorgt den Roboter mit semantischer Umgebungswahrnehmung. Convolutional Neural Networks (CNNs) werden für die objektagnostische Verarbeitung eingesetzt. Simuliertes Manipulationstraining, das Verstärkungslernen und Planungsalgorithmen kombiniert, ermöglicht Generalisierung und robuste Ausführung. Validierungen werden an realen Systemen mit praktischen Montageaufgaben durchgeführt.

Genaueres findet sich in den Einzelprojektbeschreibungen der Doktoranden bei der GSaME.

**Kontakt:**
Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel
oliver.riedel@isw.uni-stuttgart.de

Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl
alexander.verl@isw.uni-stuttgart.de

# ENTWICKLUNG EINER ENTWURFSBASIERTEN SPRACHE ZUR MONTAGEPROZESSBESCHREIBUNG FÜR AUTOMATISIERTE AUSLEGUNGSPLANUNG VON MONTAGELINIEN

**GEFÖRDERT VON DER GRADUATE SCHOOL OF EXCELLENCE ADVANCED MANUFACTURING ENGINEERING (GSAME)**

**Montagelinien sind seit vielen Jahren eine der wichtigsten Komponenten des Produktionsprozesses. Die Massenproduktion führt zur Produktion in großen Losgrößen und wird in der Regel durch Vollautomatisierung erreicht. Mit dem heutigen Trend der kundenindividuellen Massenproduktion müssen jedoch vollautomatisierte Produktionen von großen Losgrößen auf mittlere und kleine Losgrößen umgestellt werden um die Flexibilität zu erhöhen. Um eine mögliche Lösung zu finden, erfolgt die Auswertung der Montagelinienkonfiguration jedoch manuell. Der Mangel von softwaregestützten Entscheidungshilfen für eine optimale wirtschaftliche Systemkonfiguration führt somit zu hohen Planungs- und Auslegungskosten. Bei der Automatisierung des Prozesses stellt die Identifizierung von Konfigurationsvarianten der Abgleichprozesse von Betriebsmittel an die Montageprozesse die größte Herausforderung dar.**

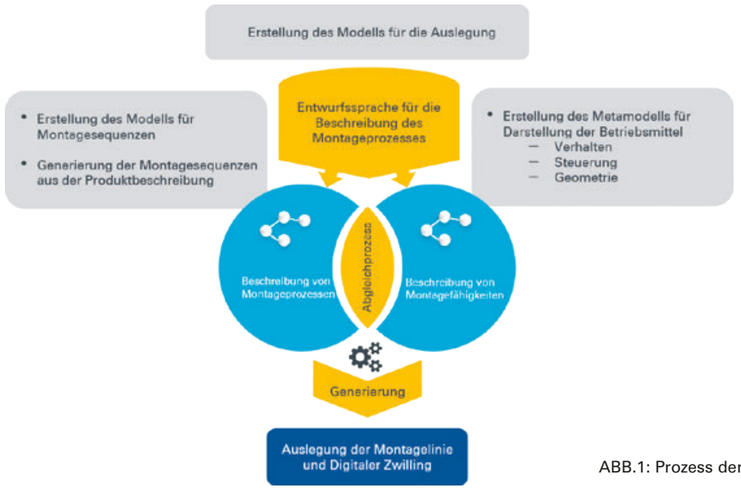



ABB.1: Prozess der Auslegungsgenerierung.

Die simulationsgestützte Inbetriebnahme von Automatisierungslösungen erhält mit der Methode der Virtuellen Inbetriebnahme Einzug in das Engineering des Maschinen- und Anlagenbaus. In der späten Engineering-Phase kann durch den Einsatz der Software-in-the-Loop- (SiL) und Hardware-in-the-Loop-Simulationen (HiL) der Automatisierungslösung die Steuerungstechnik bereits vorab ohne reale Anlagentechnik in Betrieb genommen werden. Viele Tätigkeiten der Inbetriebnahme, wie das Durchführen von Tests, können in Verbindung mit der Simulation automatisiert werden. Die Auslegung in der frühen Engineering-Phase ist jedoch ein iterativer Prozess mit geringem Automatisierungsgrad. Eine darüber hinaus von Beginn an durchgängige simulationsbasierte Planung und Auslegung ist aufgrund des geringeren Engineering-Aufwands vielversprechend, derzeit aber aufgrund fehlender Lösungskonzepte nicht möglich. Voruntersuchungen am ISW haben ergeben, dass sich aus dem digitalen Zwilling und der Engineering-Datenbasis Montageschritte vollautomatisch ableiten lassen. Hier setzt die Themenstellung dieser Forschungsarbeit an.





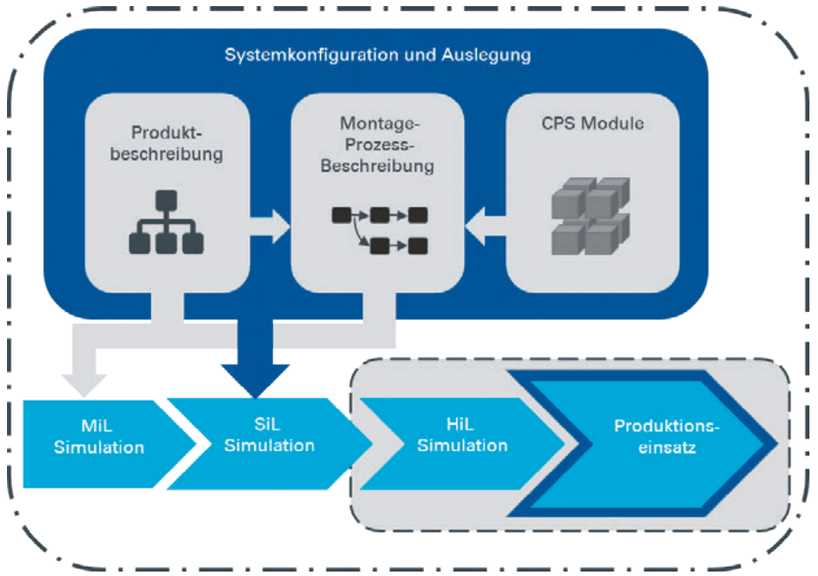



ABB. 2: Vollautomatisierte Montagelinienarchitektur.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Entwurfssprache für die Beschreibung des Montageprozesses, die eine automatische Informationskopplung zwischen Produkt und Betriebsmittel ermöglicht. Auf dieser Sprache aufbauend, wird die Entwicklung eines automatisierten Systems zur Auslegungserstellung von Montagelinien angestrebt, welche durch den Einsatz von digitalen Zwillingen mit Modellen, Methoden und Werkzeugen aus der digitalen Fabrik mit Ansätzen aus dem Model-based Systems Engineering (MBSE) kombiniert wird. Für die formale Beschreibung des Montageprozesses sowie der zu generierenden Montagelinienauslegung soll zunächst über den Ansatz des MBSE ein Metamodell für die Fähigkeitsbeschreibung von Betriebsmitteln spezifiziert werden. Zusätzlich wird ein Ontologie-Modell für die Montagesequenzbeschreibung definiert, um einen gewünschten Soll-Prozess als Produkt zu beschreiben. Eng gekoppelte Modelle zur Beschreibung von Betriebsmittel-Fähigkeiten und des Montageprozesses erlauben einen automatischen Abgleichprozess, um mögliche Betriebsmittel für die Montage eines bestimmten Produkts zu identifizieren (siehe **ABB. 1**).

Darauf aufbauend wird ein Werkzeug für die Entscheidungshilfe entwickelt, welches semantische Graph-Datenbanken in Kombination mit dem definierten Ontologie-Modell nutzt, um potentielle Montageauslegungen mit bestehenden Betriebsmitteln zu planen. Geplante Auslegungen werden abschließend über Software-in-the-loop Simulationen validiert und auf ihre Key Performance Indicators (KPI) bewertet. Das in **ABB. 2** dargestellte Architekturkonzept wird innerhalb der Arbeit experimentell validiert.

Um den Aufwand für die Erstellung einer automatisierten Montagelinie deutlich zu senken, werden die folgenden Ergebnisse aus dieser Arbeit erwartet:

- Methodik zur automatisierten Erstellung der Auslegung und ein Software-Werkzeug zur Auslegungsplanung, das diese Methodik implementiert
- Verkürzung der Designphase von Montagelinien über die automatisierte Auslegungsgenerierung
- Verbesserte Integrität des Montageliniendesigns durch die Wiederverwendung wohldefinierter Modellbeschreibungen von Betriebsmitteln
- Durchgängige Modellbeschreibung von Montagelinien
- Entwurfsbasierte Sprache zur Montageprozessbeschreibung und Datenbank von Montageprozessen und Montagefähigkeiten zur Wiederverwendung
- MiL- und SiL-Simulationsumgebung für die Entwicklung und die vollständige Offline-Inbetriebnahme von neuen Montagetechnologien
- Möglichkeit, das resultierende Software-Werkzeug im Manufacturing Execution System (MES) für eine Automatisierung der Montageplanung zu integrieren.

**Kontakt:**
Daniella Strljic, M.Sc.
daniella.strljic@isw.uni-stuttgart.de

# SOFT TISSUE ROBOTICS (IRTG STR)

## EIN GRADUIERTENKOLLEG, GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**Das internationale Graduiertenkolleg „Soft Tissue Robotics“ ist eine Kooperation zwischen verschiedenen Instituten der Universität Stuttgart und der University of Auckland in Neuseeland. Im Graduiertenkolleg werden Simulationstechnologien und -methoden für die Entwicklung und Auslegung neuer Kontrollstrategien und Automatisierungskonzepte für Roboter zur Interaktion mit weichen Materialien erforscht. Am ISW liegt der Fokus dabei auf der Lokalisierung und Handhabung von geometrisch länglichen biegeschlaffen Objekten.**

Klassische Steuerungs- und Regelungskonzepte sind beim Umgang mit weichen Materialien nur bedingt anwendbar. Aufgrund des nichtlinearen Materialverhaltens ergeben sich unendlich viele Freiheitsgrade, welche die automatisierte Handhabung mit Robotern erschweren. Auch die Simulation solcher Systeme erfordert komplexe, rechenaufwendige Modelle. Mit diesem Graduiertenkolleg soll das Verständnis für neue Technologien in der Robotik verbessert werden, indem Bereiche wie Simulationstechnologie, rechnergestützte Modellierung, Sensorik, Robotik und Kontrollmethoden kombiniert werden. Dabei werden biologische und technische Aspekte und Konzepte betrachtet und verknüpft.

## AUTONOME HANDHABUNG VON BIEGESCHLAFFEN BAUTEILEN MIT INDUSTRIEROBOTERN

Industrieroboter zeichnen sich im heutigen Produktionsumfeld insbesondere dadurch aus, gleichförmige und gleichgerichtete Arbeitsabläufe präzise und zuverlässig auszuführen. Dabei überbieten sie den Menschen hinsichtlich Genauigkeit und Ausdauer. Allerdings mangelt es ihnen an der Fähigkeit, Prozessunsicherheiten auszugleichen und flexibel auf unvorhergesehene Änderungen im Arbeitsablauf zu reagieren. Insbesondere die Handhabung von biegeschlaffen Bauteilen mit unendlich großem Konfigurationsraum stellt eine große Herausforderung dar.
In der Simulation können biegeschlaffe Körper als kinematische Mehrkörperketten approximiert werden. Das ISW forscht an Ansätzen, mit denen die momentane Konfiguration solcher biegeschlaffer Objekte eindeutig, robust und möglichst in Echtzeit zur Laufzeit aus Kameraaufnahmen rekonstruiert werden kann, damit die Handhabung biegeschlaffer Bauteile mithilfe von Robotern ermöglicht wird. Dabei wird eine geeignete Steuerungsarchitektur entwickelt, welche eine Stereokamera in den Manipulationsprozess für eine dynamische Greifpunktbestimmungen mit einbindet. Die Architektur ermöglicht die Erstellung von abstrakten Aufgaben auf hoher Ebene, die z.B. für die Formgebung von biegeschlaffen Bauteilen und für komplexere Manipulationen verwendet werden können.

ABB.1: Soft Tissue Robotics Demonstrator auf der Automatica 2022 in München.

In der Automobilindustrie werden häufig verzweigte biegeschlaffe Objekte, z.B. Kabelbäume, manipuliert. Unterschiedliche Beobachter und Matching-Algorithmen sollen die Lokalisierung und das Tracking dieser Objekte ermöglichen. Zusätzliche Schwierigkeiten entstehen dabei durch Verdeckungen, Überlappungen und einer dynamischen Umgebung. **ABB.1** zeigt die Handhabung eines Demonstratorleitungssatzes auf einem Kabelformbrett. Das Bild entstand auf der Automatica 2022 in München. Der Demonstrator nutzte die im Graduiertenkolleg entwickelten Algorithmen und Architekturen, um den biegeschlaffen Leitungssatz gezielt zu manipulieren. Aufgabe war die Montage und Demontage in eine Leitungssatzhalterung, welche beliebig vom Messebesucher versetzt werden konnte. Roboter und Leitungssatz durften dabei stets durch die Messebesucher:innen berührt und verschoben werden, was sich durch eine schnelle Synchronisation unmittelbar in der genutzten Simulationsumgebung (siehe **ABB.1** Bildschirm) zeigte.





## MASCHINELLES LERNEN AN DER SIMULATION WEICHER MATERIALIEN

Außerdem werden Methoden untersucht, um mit maschinellem Lernen an der Simulation direkt ein Mapping von Eingangssignalen auf Steuerungssignale zu erstellen. Beides ist bisher auf die Handhabung von weichen Materialien beschränkt und die Bewegung wird nicht in einer weichen Umgebung betrachtet. Am ISW wird erforscht wie vorhandene Simulationsmodelle als Lernumgebung verwendet werden können. Es wird eine Simulationsumgebung mit weichen Materialien weiterentwickelt, in der sich ein Roboter mittels Reinforcement Learning zurechtfinden und eine Aufgabe erfüllen kann. Das Konzept mit der verwendeten Software ist in **ABB. 2** dargestellt. Anhand der Simulationsumgebung wird die Steuerung von Robotern durch die Definition von Ziel- und Rahmenbedingungen erlernt. Dabei soll eine präzise Bewegung eines Roboters in einer weichen Umgebung ermöglicht werden.
Weiche Umgebungen sind beispielsweise in der Chirurgie vorhanden, wo auch vermehrt mit Robotern gearbeitet wird. Daher wird ein Anwendungsfall in diesem Bereich betrachtet, sodass die automatisierte Durchführung von Teiloperationen gelernt wird. Bei diesen muss sich ein Objekt im weichen Gewebe bewegen und mit diesem interagieren. Beispielsweise kann bei einer Katheteroperation ein Stent eingesetzt werden, wobei der Katheter über die Blutgefäße bis ans Ziel navigiert werden muss.

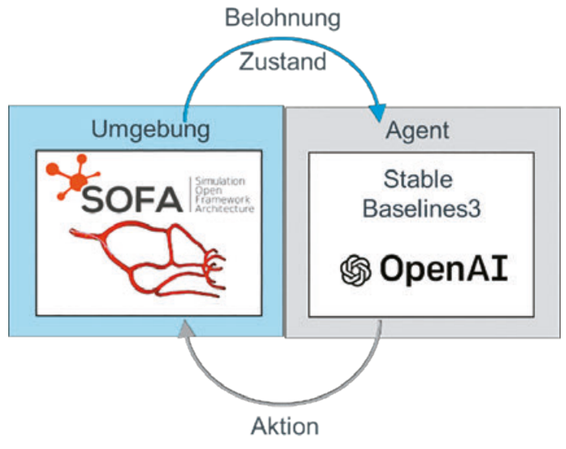



ABB.2: Konzept zum Reinforcement Learning für die Navigation in weichen Umgebungen.

**Projektpartner:**

**Kontakt:**

Manuel Zürn, M.Sc.
manuel.zuern@isw.uni-stuttgart.de

Annika Kienzlen, M.Sc
annika.kienzlen@isw.uni-stuttgart.de

# ARTIFICIAL INTELLIGENCE SOFTWARE ACADEMY (AISA)

**GEFÖRDERT DURCH DAS MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST BADEN-WÜRTTEMBERG**

**Die Artificial Intelligence Software Academy (AISA) wurde im Jahr 2021 an der Universität Stuttgart in enger Zusammenarbeit mit dem Cyber Valley und dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg initiiert. Die Akademie vereinigt die Bereiche künstliche Intelligenz (KI) mit der Softwareentwicklung, möglichen Anwendungen und ihrer Didaktik, um Forschungsfragen zu beantworten und Fachkräfte auszubilden.**

AISA wurde ins Leben gerufen, weil rapide Fortschritte in der Entwicklung künstlich-intelligenter Software neue Herausforderungen und Möglichkeiten generieren. Weltweit werden Experten benötigt, um diese Herausforderungen zu bewältigen und Möglichkeiten zu ergreifen, die Zukunft zu gestalten. Künstliche Intelligenz (KI) erfordert von Natur aus spezielle Software und damit verbundene Software-Engineering-Fähigkeiten (SE). Darüber hinaus wird in der Regel domänenspezifisches Wissen (X) in den Bereichen Ingenieurwesen, Naturwissenschaften und Didaktik benötigt, um KI effizient und effektiv in der Wissenschaft und Industrie einzusetzen. Daher zielt die AISA darauf ab, Spezialisten mit interdisziplinären Fähigkeiten in allen beitragenden Disziplinen auszubilden:

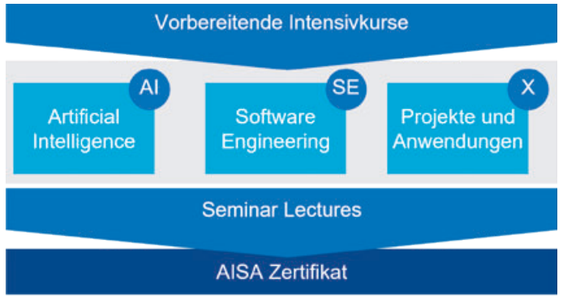



ABB.1: Struktur des AISA Trainingsprogrammes.

**AI + SE + X**

Künstliche Intelligenz (artificial intelligence, AI) wird immer stärker Innovationstreiber für neuartige industrielle Anwendungen. Sie umfasst eine Vielzahl unterschiedlicher Konzepte, Methoden und Werkzeuge. Die Beziehung zwischen domänenspezifischen Problemen, beispielsweise in Produktion oder Medizin, und geeigneten AI-Techniken zu deren Lösung ist eine wesentliche Kompetenz für Entwicklerinnen und Entwickler der Zukunft.

Software-Engineering (SE) ist die Fähigkeit, komplexe Software systematisch durch Anwendung wissenschaftlicher Prinzipien zu konzipieren, zu entwickeln, zu warten, und anzupassen. Aspekte wie Dokumentation, Testen, Lesbarkeit des Codes und Robustheit werden bei der Entwicklung von Forschungscodes, anspruchsvollen individuellen KI-Lösungen oder Simulationswerkzeugen oft vernachlässigt. SE-Fähigkeiten können jedoch die Effizienz steigern und größeren Teams zugutekommen. Darüber hinaus verringert SE die Kluft beim Austausch von akademischen und industriellen Lösungen und verbessert die Nachhaltigkeit von Software und verwandten Methoden.

Anwendungsbereiche (X) werden von spezifischen Anforderungen begleitet. So müssen beispielsweise die Grundprinzipien des Fachgebiets berücksichtigt werden, und die Datensätze können ungenau sein. Darüber hinaus können die Versuchsbedingungen relevante Einschränkungen darstellen, die nicht aus den Daten hervorgehen. Daher bringt die Interaktion mit einer domänenspezifischen Forschungsdateninfrastruktur einen erheblichen Mehrwert für die Praxistauglichkeit der Forschung.

Das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen trägt zum SE + AI-Teil der AISA bei. Es bildet Forscher aus und unterstützt sie dabei, zuverlässigere und praktischere Softwaresysteme zu entwickeln, die in den relevanten Anwendungsbereichen eingesetzt werden können (X).

Aktuell laufen zwei Promotionsprojekte:

1. Marijana Palalic „Erklärbare Künstliche Intelligenz und Transfer Learning für die prozesssichere additiv-subtraktive Fertigung von Hochleistungskomponenten", betreut von Prof. Steffen Becker, Prof. Hans-Christian Möhring und Jun.-Prof. Dr. Andreas Wortmann.
2. Shermin Sherkat „Innovative KI für Nachhaltige Bauprozessplanung im Holzbau", betreut von TT-Prof. Thomas Wortmann und Jun.-Prof. Dr. Andreas Wortmann.

**Kontakt:**
Jun.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Andreas Wortmann
andreas.wortmann@isw.uni-stuttgart.de

Anfragen zur kostenfreien Übersendung von Belegexemplaren oder zwecks redaktioneller Mitarbeit richten Sie bitte an

**Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV)**
Finkenstraße 10 • D–68623 Lampertheim
**www.institut-wv.de**

Telefon 06206 939-0 • info@alphapublic.de

## MODEL-BASED DEVOPS (MBDO)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**Das Ziel des Projekts Model-Based DevOps besteht darin, eine Grundlage für ein modellbasiertes Framework zu entwickeln, das eine Vereinheitlichung unterschiedlicher Modelltypen im Kontext von IoT- und cyber-physischen Systemen ermöglicht. Dazu wird ein neues Konzept zur automatisierten Migration zwischen Softwareentwicklungs- und Betriebsmodellen entworfen, implementiert und auf einem industriellen Demonstrator evaluiert. Im Bereich der virtuellen Produktion wird so die Entwicklung und die Wartung von digitalen Modellen vereinfacht. Durch das modellbasierte DevOps-Framework werden bei der Entwicklung und dem Betrieb von IoT- und cyber-physischen Systemen die Qualität, Nachhaltigkeit und Widerstandsfähigkeit der Software verbessert und gleichzeitig werden die Kosten und Risiken reduziert.**

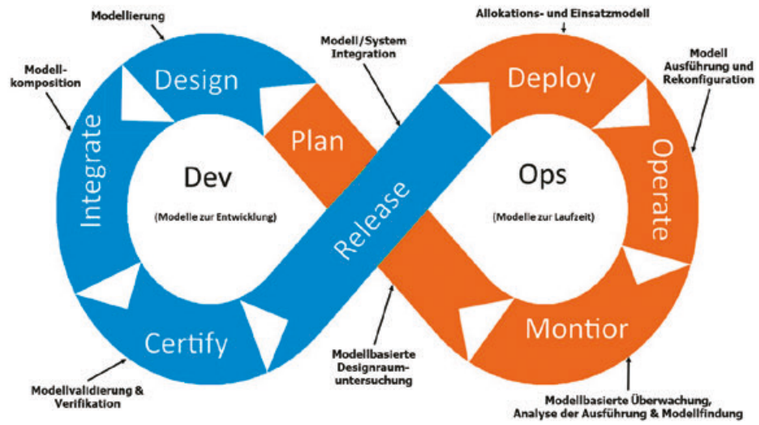



ABB.1: DevOps Lebenszyklus für Modelle, der zum Entwurf und zum Betrieb von cyber-physischen Systemen in IoT-Systemen angewandt wird. Bild in Anlehnung an modellbasierten DevOps Zyklus von C.Benoit, 2020.

Um die Vision der Industrie 5.0 der Europäischen Kommission für eine nachhaltige und widerstandsfähige digitalisierte Industrie zu realisieren, bei der die Bedürfnisse des Menschen im Vordergrund stehen, sind zwei Schlüsseltechnologien von entscheidender Bedeutung: cyber-physische Systeme (CPS) und das Internet der Dinge (IoT). In diesem Zusammenhang verfolgt das Model-Based DevOps Projekt den DevOps-Ansatz, der in **ABB.1** abgebildet ist.
Dazu werden zwei Modelle in Bezug auf ihre Nutzungen betrachtet: das Softwareentwicklungs- (Dev) und das Betriebs- (Ops) Modell. Es wird angestrebt, diese Modelle in einem nahtlosen, hochintegrierten und kontinuierlichen Kreislauf zu verbinden. Dadurch kann die Systementwicklungszeit verkürzt und eine kontinuierliche Bereitstellung hochwertiger Software für IoT-Systeme gewährleistet werden.
Diese Modelle werden zum einen bei der Codegenerierung beim Entwurf eingesetzt, zum anderen werden sie während der Laufzeit zur Konfiguration von IoT-Systemen genutzt. Betriebsmodelle können während der Laufzeit automatisch, sofort oder mit Verzögerung, von einem menschlichen Bediener oder Designer aktualisiert werden. Automatisch selbstanpassende Modelle und auch vom Menschen anpassbare Modelle sind Teil eines digitalen Zwillings Systems. Strukturell festgelegte Entwurfsmodelle, die bei der Softwareentwicklung eingesetzt werden, definieren die Struktur jenes Zwillings.
Diese Modelle sind derzeit getrennt und können entweder während des Entwurfs oder zur Laufzeit verwendet werden. Anpassungen und Optimierungen am Betriebsmodell gehen damit verloren, da derzeit keine Möglichkeit besteht, Betriebsmodelle in Entwicklungsmodelle oder umgekehrt zu migrieren. Daher muss das Entwicklungsmodell manuell geändert werden, was mit hohen Kosten verbunden ist.
Um dieses Problem zu lösen, werden im MBDO-Projekt drei zentrale Herausforderungen angegangen.
Die erste Herausforderung besteht darin, Unterstützung für die automatisierte Verwaltung der Überwachung (beim Schritt Monitor zum Schritt Plan in **ABB.1**) des Ops Modells einzurichten.
Dazu muss die Verbindung zwischen Entwicklungsmodellen und dem Softwaresystem nachvollziehbar gestaltet, Datenproben in Ops in Verbindung zu konfigurierten Modellen zur Laufzeit gesammelt und die kontrollierte Aktualisierung von Betriebsmodellen zur Selbstanpassung ermöglicht werden.
Die zweite Herausforderung besteht darin, die Überwachung durch einen digitalen Zwilling einzurichten, der als Informations- und Kontrollzentrum zwischen Dev und Ops dient und digitale Schatten speichert und miteinander verbindet.
Die dritte Herausforderung besteht darin, einen Tool Support einzurichten, um den Datenfluss zwischen Entwicklung und Betrieb zu automatisieren, indem der digitale Zwilling als Vermittler genutzt wird, um Laufzeitabweichungen zu erkennen und sie an die Entwicklungsmodelle weiterzugeben, und die Entwicklung komplexer IoT-Systeme zu unterstützen.
Zur Bewältigung der Herausforderungen wird zunächst eine Analyse der Werkzeuge und Methoden durchgeführt, die bei der Entwicklung und Betrieb von digitalen Schatten verwendet werden. Das Ziel dieser Analyse besteht darin, auf der Grundlage von Korrespondenzen zwischen Entwicklungs- und Betriebsmodellen ein Konzept zur Transformation zwischen den Modellen zu entwickeln. Die identifizierten Korrespondenzen und das Konzept werden verwendet, um eine Methode und eine prototypische Umsetzung zu entwickeln. Die prototypische Umsetzung zielt darauf ab, Änderungen und Daten, die das System erhält, in Modellaktualisierungen zu transformieren und diese sicher auf die betroffenen Modelle anzuwenden.
Im Rahmen einer Studie werden eine Reihe von Modellaktualisierungen zur Evaluation der Transformationsinfrastruktur auf einem industriellen Demonstrator durchgeführt. Dabei werden komplexe Daten aus Engineering- und Simulationsmodellen wie geometrische, kinematische und Verhaltensdaten verwendet. Abschließend wird die funktionale Eignung, Leistungseffizienz, Nutzbarkeit und Zuverlässigkeit der Methode evaluiert.
Das angestrebte Resultat dieses Projekts besteht darin eine Grundlage für ein modellbasiertes DevOps-Framework zu konzipieren und zu implementieren, mit dem Ziel, bei der Entwicklung und dem Betrieb von IoT-Systemen und CPS in der Produktion durch Nutzung der Vorgangsweise des modellgetriebenen DevOps, eine Steigerung der Effizienz, Produktivität und Qualität, sowie eine Reduktion der Kosten und Risiken zu erzielen.

**Projektpartner:** Université de Rennes 1, SE RWTH Aachen University

**Kontakt:**
Jingxi Zhang, M.Sc.
jingxi.zhang@isw.uni-stuttgart.de

# ADAPTIVE PULSWEITENMODULATION ZUR EFFIZIENZSTEIGERUNG ELEKTRISCHER SERVOANTRIEBE IN WERKZEUGMASCHINEN (Adaptive PWM)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**In Werkzeugmaschinen werden in Abhängigkeit des Fertigungsschritts unterschiedliche Anforderungen an die Vorschubantriebe gestellt. In diesem Forschungsprojekt wird ein Verfahren entwickelt, mit welchem die Frequenz der Pulsweitenmodulation (PWM) und somit die Dynamik der Antriebe adaptiv zur Laufzeit an die aktuellen Genauigkeitsanforderungen des Fertigungsschritts angepasst wird. Dabei werden Schaltverluste in der Leistungselektronik minimiert und die Energieeffizienz verbessert.**

An Vorschubantriebe heutiger Werkzeugmaschinen werden hohe Anforderungen bezüglich Ihrer Dynamik gestellt. Um die geforderte Produktqualität und geringe Bahnabweichungen auch unter Einfluss von Störkräften einzuhalten, müssen die Antriebe ein gutes dynamisches Verhalten aufweisen. Hierzu tragen hohe PWM-Frequenzen im Antriebsumrichter bei, welche die Totzeiten im System geringhalten und somit die Bandbreite maximieren. Basierend auf den Eigenschaften der Maschinen und den Anforderungen der Prozesse werden die Regelparameter und PWM-Frequenzen üblicherweise fix eingestellt. Untersuchungen zeigen jedoch, dass die maximale Dynamik für viele Fertigungsschritte nicht notwendig ist, da keine hohen Genauigkeiten gefordert sind. Hierzu zählen z. B. Schruppbearbeitungen, aber auch Fahrten zum Werkzeugwechsler oder ein Stillstand der Achse.
Hohe PWM-Frequenzen, welche für eine hohe Dynamik des Antriebs notwendig sind, verursachen jedoch signifikante Schaltverluste in den Leistungshalbleitern. Dies vermindert die Energieeffizienz, führt zu Mehraufwand für die entsprechende Wärmeabfuhr und reduziert die Lebensdauer.
**ABB. 1** zeigt den Ansatz der adaptiven PWM. Um die Energieeffizienz in Werkzeugmaschinen weiter zu steigern soll in den Prozessschritten, in denen geringere Anforderungen an Genauigkeit und Dynamik gestellt werden, die PWM-Frequenz zur Laufzeit reduziert werden. Daraus resultieren eine Reduzierung der Schaltfrequenz der Leistungshalbleiter und folglich geringere Schaltverluste. Durch Anpassung der PWM-Frequenz ändert sich das Systemverhalten, daher werden die Regelparameter zur Laufzeit angepasst.
Die Integration der adaptiven PWM in eine Antriebsplattform erfordert Modifikationen der Schaltsignalgenerierung, sowie in allen Kaskaden der Regelung, wie in **ABB. 1** dargestellt. Die am ISW entwickelte FPGA-basierte Open Automation Platform (OAP) erfüllt die grundlegenden Anforderungen. Die OAP bietet auf den Ebenen Hardware, FPGA-Logik und Software vollständige Offenheit und lässt sich so an individuelle Anforderungen anpassen. Die OAP eignet sich aufgrund der

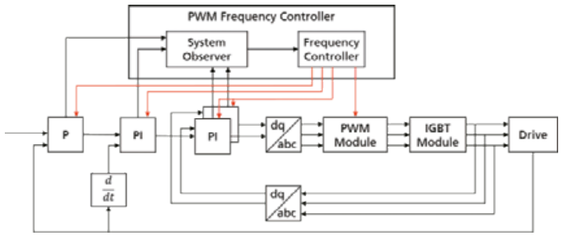



ABB.1: Systemaufbau eines Vorschubantriebs mit Reglerkaskade und Leistungselektronik mit übergeordneter Schaltfrequenzregelung.

kompakten Größe und des geschlossenen Gehäuses auch für den Einsatz in einem industriellen Umfeld.
Das Verfahren der adaptiven PWM wurde an einem Versuchsstand mit einer NC-Steuerung, einer OAP als Antriebsplattform und einem Motor mit Linearachse experimentell untersucht. **ABB. 2** zeigt Messungen des Energieverbrauchs mit konstanten und variablen PWM-Frequenzen bei simulativer Fertigung eines Bauteils. Dabei werden unterschiedlichen Schaltstrategien angewendet. Über die NC kann auf Werte

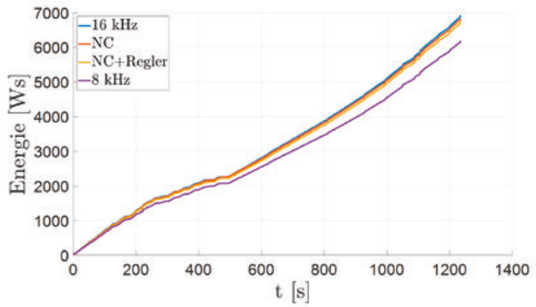



ABB.2: Energiemessung bei verschiedenen PWM-Frequenzen und unterschiedlichen Schaltstrategien.

zugegriffen werden, ob sich die Werkzeugmaschine im Eilgang oder im Werkzeugwechsel befindet. Zusätzlich sind die Regelfehler ein Indiz dafür, wie die aktuellen Anforderungen des Prozessschritts sind.
Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass Einsparpotential durch eine adaptive PWM-Frequenz besteht. Um eine umfassende und ganzheitliche Bewertung des Verfahrens vornehmen zu können, wird das Verfahren der adaptiven PWM im weiteren Verlauf in eine reale Werkzeugmaschine integriert und hinsichtlich aller relevanten Aspekte wie Dynamik, Genauigkeit, Fertigungsprozess und Energieverbrauch analysiert.

**Kontakt:**
Manuel Weiss, M.Sc.
manuel.weiss@isw.uni-stuttgart.de

STUTTGARTER INNOVATIONSTAGE

**TRENDS UND INNOVATIONEN RUND UM DAS THEMA STEUERUNGSTECHNIK UND DIGITALISIERUNG**

Die hohe Skalierbarkeit und der Ressourcenreichtum von Cloud-Plattformen sollen auch für die Steuerungstechnik nutzbar gemacht werden. Dieser Gedanke war 2017 Grundlage der ersten Veranstaltung „Stuttgarter Innovationstage – Steuerungstechnik aus der Cloud“. Inzwischen wird die Veranstaltung jährlich durchgeführt und informiert über die aktuellen Trends und Innovationen rund um das Thema Steuerungstechnik und Digitalisierung.

Weitere Informationen zur nächsten Veranstaltung finden Sie unter:

**www.stuttgarter-innovationstage.de**

ORGANISATION ISW VERANSTALTER FISW

# VORSPANNUNGSNACHSTELLUNG AN KUGELGEWINDETRIEBEN MITTELS PASSIVER MECHANIK (VoKuMe)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**In diesem Forschungsprojekt wird die Entwicklung und Validierung eines neuartigen mechanischen Ansatzes zur belastungsadaptiven Nachstellung der Vorspannkraft bei Kugelgewindetrieben erforscht. Dazu wird eine zweigeteilte Doppelmutter mit einem auf Keilelementen basierenden Mechanismus versehen, welcher durch radiales Einrutschen einen definierten Axialversatz und dadurch eine Veränderung der Vorspannkraft zwischen den Mutternhälften erzeugt. Ziel des Ansatzes ist es, die Vorspannkraft über die gesamte Lebensdauer der Vorschubachse auf nahezu konstantem Niveau zu halten.**

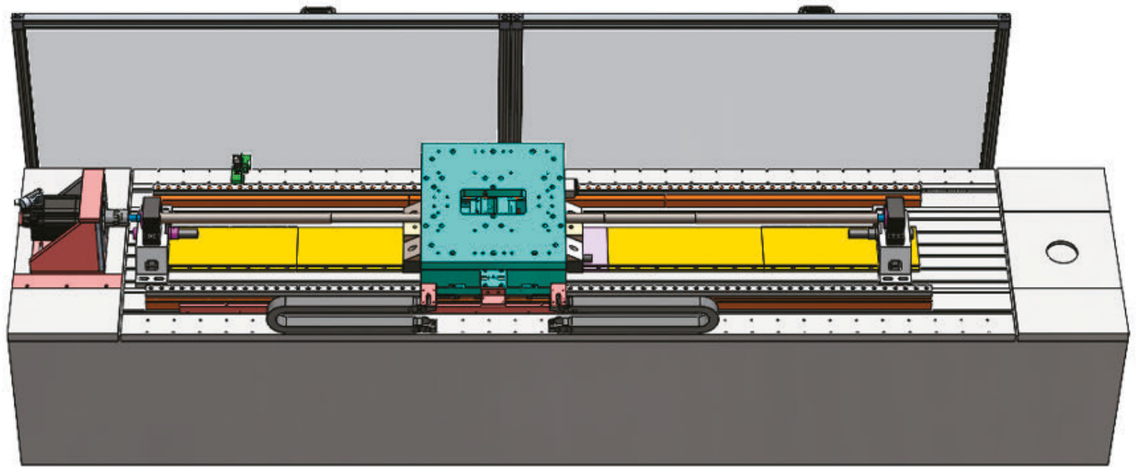


ABB.1: KGT-Prüfstand am ISW mit Doppelmutter-Prototyp.

Kugelgewindetriebe (KGT) sind Maschinenkomponenten, welche zur hochdynamischen und nahezu spielfreien Umwandlung einer rotatorischen in eine translatorische Bewegung und umgekehrt eingesetzt werden. Mithilfe umlaufender Kugeln, welche an Spindel und Mutter abwälzen, können auftretende Kräfte mit gutem Wirkungsgrad sowie vergleichsweise geringen Reibeinflüssen übertragen werden. Aufgrund ihrer Vorteile gegenüber alternativen Antriebssystemen, wie beispielsweise Lineardirektantriebe oder Zahnstange-Ritzel-Antriebe, bilden KGT nach wie vor die am häufigsten eingesetzte Technologie für elektromechanische Vorschubachsen.
Werden KGT zur definierten Positionierung eingesetzt, gilt es Nachgiebigkeit und Umkehrspiel im Antriebsstrang zu minimieren. Dazu wird die Mutter des KGT meist initial stark vorgespannt. Für die Dimensionierung der Vorspannkraft gelten konträre Ziele: Mit hoher Vorspannung gehen minimales Umkehrspiel und hohe Steifigkeit einher, wodurch gutes statisches und dynamisches Übertragungsverhalten des KGT resultiert. Gleichzeitig steigt jedoch die Reibung, woraufhin Wirkungsgrad und Lebensdauer signifikant absinken. Bisher ist das Verhalten der Vorspannkraft über die Lebensdauer schwer vorherzusagen und nur indirekt und mit großem Aufwand messbar. Die Reduzierung der zulässigen Betriebskraft durch Verschleiß soll durch die Wirkung des Nachstellmechanismus kompensiert werden (**ABB. 2**). Die Vorspannungsnachstellung lässt sich anhand der drei Phasen im Diagramm erklären: **(I)** Vorspannungsminderung durch Verschleiß. **(II)** Aufbringen einer Lastkraft F, die zur Entlastung einer Mutter führt. **(III)** Separierung der lastfreien Mutter um $\Delta x$, Einrutschen eines federbelasteten Keils und dadurch Erhöhung der Vorspannkraft.

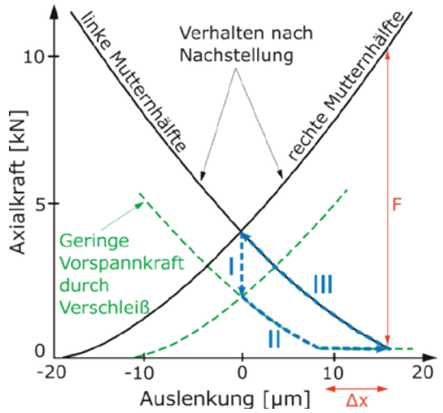



ABB.2: Wirkung des Nachstellmechanismus im Verspannungsdiagramm.

Primäres Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung und Evaluation eines passiven Mechanismus (**ABB. 3**), welcher die selbstständige, belastungsgerechte Nachstellung der Vorspannung in KGT-Doppelmuttern ermöglicht. Zusätzlich wird eine ausreichende Robustheit gegenüber statischen und dynamischen Störgrößen sowie thermischen Erwärmungen angestrebt. Dadurch soll eine Verbesserung der Lebensdauer bei gleichbleibendem Betriebsverhalten erfolgen.

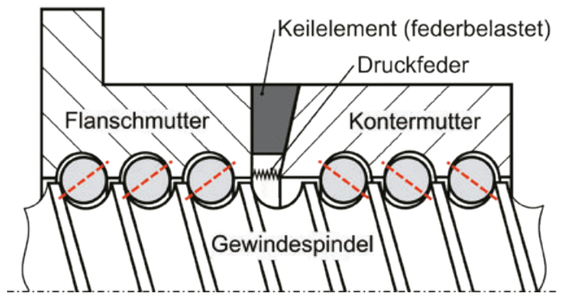



ABB.3: Funktionsprinzip des passiven Nachstellmechanismus.

Zunächst wurden unterschiedliche Konzepte zur Umsetzung der passiven Nachstellmechanik – wie beispielsweise axiale Federn mit diskreter oder kontinuierlicher Bewegungscharakteristik – erarbeitet, verglichen und bewertet. Die Integrierbarkeit der erarbeiteten Konzepte in bestehende KGT-Doppelmuttern stellt dabei eines der wichtigsten Ziele dar. Um dies zu erreichen, wurde anfangs ein detaillierter Anforderungskatalog hinsichtlich der statischen und dynamischen Lasten, der geometrischen Randbedingungen sowie möglichen Störeinflüssen definiert. Darauf aufbauend schließt sich eine quantitative Dimensionierung der relevanten Parameter (Nachstellweg, Steifigkeit, Auswirkung von Störeinflüssen etc.) an, welche unter Verwendung von FE-Simulationen abläuft. Die geeignetste Variante wird anschließend detailliert konstruiert, in ein entsprechendes Funktionsmuster (**ABB. 4**) überführt und messtechnisch auf einem KGT-Prüfstand (**ABB.1**) untersucht. Dies betrifft sowohl die grundlegende Funktion der Vorspannungsnachstellung als auch die Robustheit gegenüber Störeinflüssen.

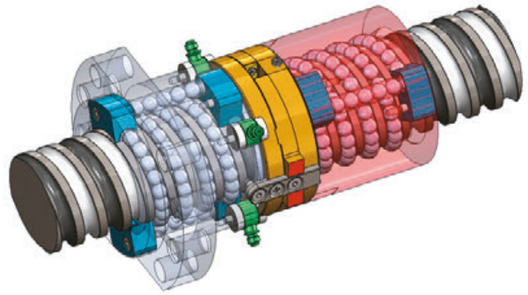


ABB.4: Doppelmutter-Prototyp mit zwei symmetrischen Keilelementen.

Mehr zum Thema:

**Kontakt:**
Oliver Jud, M.Sc.
oliver.jud@isw.uni-stuttgart.de

# NEUARTIGE POSITIONSREGELUNG FÜR ELEKTRISCH VERSPANNTE ZAHNSTANGE-RITZEL-ANTRIEBSSYSTEME ZUR STEIGERUNG DER GENAUIGKEIT (Master-Switch)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**Das zur Steigerung der Genauigkeit zu kompensierende Umkehrspiel tritt bei Zahnstange-Ritzel-Antrieben im Getriebe und zwischen Zahnstange und Ritzel auf. Eine effektive und dem Stand der Technik entsprechende Methode zur Minimierung des Umkehrspiels stellt die elektrische Verspannung zweier redundanter Antriebe dar. Neben den dynamischen Eigenschaften des in Werkzeugmaschinen eingesetzten Antriebssystems werden insbesondere an dessen Genauigkeit hohe Anforderungen gestellt. Ein Lösungsansatz zur Genauigkeitssteigerung von Zahnstange-Ritzel-Antrieben ist der Einsatz von Messsystemen entlang der Achse. Diese stellen jedoch bei großen Verfahrwegen häufig einen zentralen Kostenpunkt der Vorschubachse dar und werden aus diesem Grund bei dem Forschungsprojekt nicht verwendet. Für die Lageregelung werden erstmals die Messsysteme beider Antriebe verwendet und mit dem Master-Switch zwischen den Motoren umgeschaltet, um eine Kraftübertragung zu gewährleisten.**

Die Fertigungsgüte und Dynamik moderner Produktionsanlagen wird wesentlich durch die eingesetzten Antriebssysteme bestimmt. Die in diesem Vorhaben betrachteten Zahnstange-Ritzel-Antriebe (ZRA) zeichnen sich für den Einsatz in Werkzeugmaschinen insbesondere dadurch aus, dass ihre Steifigkeit unabhängig von der Verfahrlänge ist und somit lange Linearbewegungen bei hohen Kräften realisiert werden können. Die zentralen Probleme, welche die erzielbare Genauigkeit und Dynamik limitieren, sind Gleichlauffehler und das Umkehrspiel aufgrund von fertigungsbedingten Kinematikfehlern im Antriebsstrang. Bei ZRA wird das Umkehrspiel durch die Verzahnung und Lagerung im Getriebe sowie durch den Zahnstange-Ritzel-Kontakt verursacht. Systemtheoretisch betrachtet, stellt das Umkehrspiel eine Nichtlinearität dar und beeinflusst somit die Regelgüte des Antriebssystems negativ. Um den Anforderungen moderner Produktionsanlagen gerecht zu werden, ist eine Reduktion bzw. Kompensation des Umkehrspiels, das konstruktiv nicht vermieden werden kann, notwendig. Neben den dynamischen Eigenschaften des Antriebssystems werden insbesondere an dessen Genauigkeit hohe Anforderungen gestellt. Um eine hohe Positionier- und Bahngenauigkeit zu erreichen, werden im aktuellen Stand der Technik überwiegend lineare Messsysteme für eine direkte Lageregelung eingesetzt. Diese Messsysteme bestimmen die Position des Maschinentischs, sodass das Umkehrspiel Teil der Regelstrecke ist und damit in gewissem Maße ausgeregelt werden kann. Für die direkte Lageregelung ist allerdings ein Linearmaßstab entlang des gesamten Verfahrweges notwendig. Besonders bei Vorschubachsen mit großer Verfahrlänge stellt dies einen zentralen Kostenfaktor dar. Um die Kosten zu reduzieren, wird bei großen Werkzeugmaschinen häufig das Messsystem eines Antriebs für die Lageregelung verwendet, sodass auf ein lineares Messsystem verzichtet werden kann. Dies führt jedoch zu Genauigkeitsverlusten durch Abweichungen zwischen Motor- und Tischposition, da der mechanische Antriebsstrang und damit auch das Umkehrspiel nicht Teil der Regelstrecke sind. Durch eine elektrische Verspannung mit einem zweiten Antrieb kann das Umkehrspiel von ZRA kompensiert werden.

ABB.1: Versuchsstand mit Zahnstange-Ritzel-Antrieb am ISW.

Hierbei kommen zwei Antriebe zum Einsatz, die mit Hilfe eines Momentenausgleichsreglers gegeneinander verspannt werden. In **ABB. 1** ist der Versuchsstand am ISW mit verspannter Konfiguration abgebildet.

Aufgrund der elektrischen Verspannung durch ein Drehmoment $M_V$ tritt das Umkehrspiel nie in beiden Antrieben gleichzeitig auf. Das Umkehrspiel wird durchlaufen, wenn das Drehmoment eines Antriebs das Vorzeichen wechselt (siehe **ABB.2**).

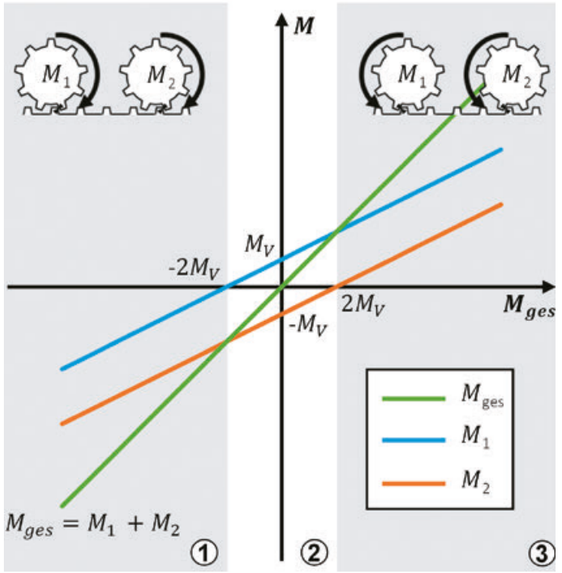



ABB.2: Drehmomentverläufe der Antriebe durch die elektrische Verspannung [T. Engelberth, A. Verl und M. Heckmann, „Potenziale von Zahnstange-Ritzel-Antriebssystemen", Antriebstechnik, pp. 52-58, 2018].

Somit erfährt Antrieb 1 bei $-2M_V$ und Antrieb 2 bei $+2M_V$ einen Flankenwechsel, wodurch die Antriebe das Umkehrspiel nicht gleichzeitig durchlaufen und einer der Antriebe immer kraftübertragend ist.

**Lösungsansatz**

Zentrales Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines Konzeptes, Master-Switch genannt, welches die Genauigkeit von elektrisch verspannten Zahnstange-Ritzel-Antrieben mit indirekter Lageregelung soweit verbessert, dass diese den Genauigkeitsbereich direkt geregelter Systeme erreichen. Der Kompensator nutzt dazu die spezifischen Eigenschaften von elektrisch verspannten Antrieben. So werden erstmals die Messsysteme beider Antriebe für die Lageregelung verwendet.

Das Master-Switch Konzept basiert auf der Idee, dass durch Umschalten auf das Gebersignal des kraftübertragenden Motors das Umkehrspiel nicht Teil der Regelstrecke ist und damit die Genauigkeit indirekt geregelter ZRA zu steigern. Um die Genauigkeit weiter zu erhöhen und den Bereich direkt geregelter Systeme zu erreichen, wird außerdem ein Ansatz zur Rekonstruktion der Tischposition anhand der Messsysteme beider Antriebe entwickelt und integriert.

Der Master-Switch wird in den Lageregelkreis implementiert und erweitert die Istwertaufbereitung ohne zusätzliche Hardwarekomponenten. Die Integration in den Lageregelkreis ist in **ABB. 3** dargestellt und zeigt die neuartige Lageregelung für elektrisch verspannte Zahnstange-Ritzel-Antriebssysteme.

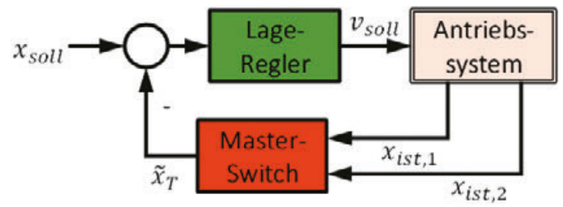



ABB.3: Integration des Master-Switch in den Lageregelkreis.

**Kontakt:**
Valentin Leipe, M.Sc.
valentin.leipe@isw.uni-stuttgart.de

# VERBESSERUNG DES DYNAMISCHEN VERHALTENS VON INDUSTRIEROBOTERN DURCH ADAPTIVE GETRIEBEVORSPANNUNG (AdaVoS)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**Industrieroboter weisen aktuell noch nicht für alle Anwendungsgebiete eine ausreichende Steifigkeit und Genauigkeit auf. Dies liegt unter anderem an auftretenden Hystereseeffekten in den einzelnen Gelenken. In der Lineartechnik kann eine auftretende Hysterese bei Zahnstange-Ritzel-Antrieben durch gegenseitige Verspannung der Zahnräder reduziert werden. Im Rahmen dieses Forschungsprojekt soll untersucht werden, wie eine adaptive Verspannung auch in Industrierobotern zum Einsatz kommen kann, um diese so zu neuen Aufgaben zu befähigen.**

**Motivation**
Industrielle Knickarmroboter bieten gegenüber klassischen Werkzeugmaschinen signifikante Vorteile in Bezug auf einen größeren Arbeitsraum, höhere Flexibilität und geringere Anschaffungskosten. Daher werden IR bereits heute für einen weiten Bereich von Aufgaben wie Handhabung, Beschichtungsprozesse, Montagevorgänge bis hin zu Schweiß-, Laser- und Bearbeitungsanwendungen eingesetzt. Der aktuelle Trend geht von diesen Aufgaben, die vor allem durch Punktgenauigkeit und geringe Prozesskräfte charakterisiert werden, hin zu Anwendungen mit höheren Anforderungen an Bahngenauigkeit größeren Prozesskräften. Für diese Aufgaben, wobei vor allem zerspanenden Prozesse im Fokus der Untersuchungen stehen, sind Roboter nach dem Stand der Technik nur begrenzt geeignet.

**Problemstellung**
Industrieroboter besitzen zwar eine gute Wiederholgenauigkeit, erreichen jedoch ohne zusätzliche Kompensations- und Kalibrierverfahren nur eine schlechte Absolutgenauigkeit. Zusätzlich besitzen Industrieroboter eine vergleichsweise geringe Steifigkeit, die zudem auch stark abhängig von der aktuellen Pose des Roboters ist. Der Einsatz von Robotern für Bearbeitungsaufgaben kann daher derzeit nur Erfolgen, wenn geringe Prozesskräfte auftreten, oder Kompromisse bei der Bearbeitungsgenauigkeit und -qualität eingegangen werden können. Ursache für die fehlende Absolutgenauigkeit und die nachteiligen Dynamikeigenschaften sind im Wesentlichen die zum Einsatz kommenden Getriebe der einzelnen Gelenkachsen. Diese weisen ein nichtlineares Übertragungsverhalten auf, das durch eine Hysteresekurve beschrieben werden kann.

**Zielsetzung**
Der Projektpartner, das Institut für Elektrische Energiewandlung (IEW) der Universität Stuttgart, hat ein Getriebekonzept entwickelt und patentiert, das ein Planetengetriebe mit elektrisch angetriebenen Planetenrädern beinhaltet. Sind die einzelnen Planetenräder separat ansteuerbar, ermöglicht dies eine Verspannung von Planetenrädern gegeneinander, analog zur bei linearen Zahnstange-Ritzel-Antrieben zum Einsatz kommenden Verspannung zur Verbesserung der Steifigkeit und der Umkehrspielkompensation. Die Verspannung bewirkt wie in **ABB. 1** dargestellt eine Verschiebung des Arbeitspunkts in der Hysteresekurve. Das Getriebe wird in einem Bereich mit höherer Steifigkeit und geringem Spiel betrieben. Im Rahmen des Forschungsprojekts soll ein Getriebekonzept entwickelt und experimentell validiert werden, welches in Knickarmrobotern eingesetzt deren dynamische Eigenschaften verbessert, und sie so zum Einsatz für Bearbeitungsaufgaben befähigt.

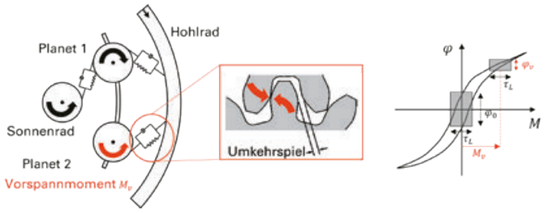



ABB.1: Schema der adaptiven Verspannung und daraus resultierende Verschiebung des Arbeitspunkts in der Hysteresekurve.

**Projektpartner:**

**Kontakt:**
Andreas Schütz, M.Sc.
andreas.schuetz@isw.uni-stuttgart.de





# ADAPTIVE VERSPANNUNG ZUR STEIGERUNG DER PERFORMANZ ELEKTRISCH VERSPANNTER ZAHNSTANGE-RITZEL-ANTRIEBE

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**Elektrisch verspannte Zahnstange-Ritzel-Antriebe werden eingesetzt, wenn große Vorschubkräfte und lange Verfahrwege bei gleichzeitig hoher Präzision gefordert werden. Mangelhafte Energieeffizienz und erhöhter Verschleiß aufgrund der konstanten Verspannung sind eine zentrale Schwachstelle. Diesem Problem soll durch die Entwicklung einer Methode zur bedarfsgerechten Anpassung des Verspannungsmoments während des Betriebs begegnet werden.**

Von modernen Produktionsanlagen wird eine hohe Fertigungsqualität bei zunehmend steigenden Anforderungen an die Bearbeitungsgeschwindigkeit und Dynamik erwartet. Die verbauten Antriebssysteme spielen hierbei eine zentrale Rolle. Für Werkzeugmaschinen bestimmen die in den Vorschubachsen verbauten Antriebe maßgeblich die erreichbaren Vorschub- und Beschleunigungskräfte sowie die Positionier- und Bahngenauigkeit. Zahnstange-Ritzel-Antriebe (ZRA) werden dabei vor allem eingesetzt, wenn lange Verfahrwege sowie hohe Kräfte gefordert werden. Um die negativen Einflüsse des geometrischen Umkehrspiels zu begrenzen, werden dabei häufig elektrisch verspannte Antriebe eingesetzt. Hierbei werden zwei baugleiche Antriebe auf einer Achse verbaut, die regelungstechnisch mit einem Differenzmoment beaufschlagt werden (**ABB.1**). Im Stand der Technik wird dieses Verspannungsmoment in den meisten Fällen während der Inbetriebnahme einer Anlage basierend auf Erfahrungswerten ermittelt und anschließend fest eingestellt. Dieser Sachverhalt ist dem Fehlen eines sinnvoll und robust anwendbaren Vorgehens zur Einstellung des Verspannungsbetrags – auch während des Betriebs geschuldet.
Neben der Unterdrückung von Umkehrspiel verändert die Verspannung weitere relevante Systemeigenschaften wie Steifigkeit und Dämpfung der Mechanik. Ein höheres Verspannungsmoment ermöglicht in der Folge eine höhere Dynamik und Genauigkeit des Antriebssystems. Gleichzeitig geht eine höhere Verspannung aber auch stets mit einer stärkeren Belastung der Komponenten sowie einer verringerten Energieeffizienz einher. Die Wahl des Verspannungsbetrages stellt folglich einen Zielkonflikt dar (**ABB.2**).
Abhilfe kann hier eine Methodik zur bedarfsgerechten Einstellung des Verspannungsbetrags während des Betriebs elektrisch verspannter Zahnstange-Ritzel-Antriebe schaffen. Um die negativen Auswirkungen eines hohen Verspannungsmoments minimal zu halten, wird ein Regelungsverfahren zur Adaptation der Verspannung anhand aussagekräftiger Größen zum aktuellen Betriebszustand erforscht. Nur in Betriebszuständen, in denen eine hohes Verspannungsmoment zur Erzielung der geforderten Dynamik und Genauigkeit zwingend erforderlich ist, soll dieses auch abgerufen werden. Auf diese Weise können im Vergleich zum bestehenden Stand der Technik Energieverbrauch und Verschleiß reduziert und gleichzeitig ein Maximum an Dynamik erzielt werden.

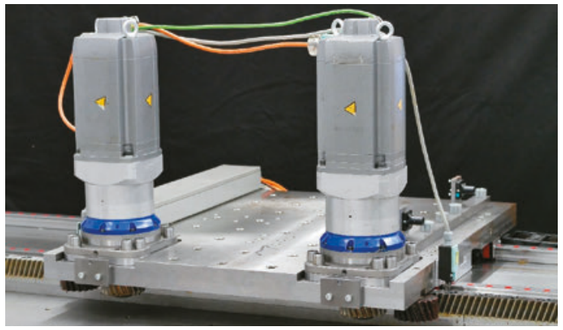


ABB.1: Elektrisch verspannter Zahnstange-Ritzel-Antrieb.

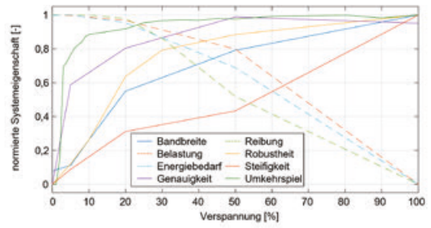



ABB.2: Veränderung ausgewählter Systemeigenschaften in Abhängigkeit von der Verspannung.

**Kontakt:**
Lukas Steinle, M.Sc.
lukas.steinle@isw.uni-stuttgart.de

# ANTRIEBSBASIERTE SCHWINGUNGSDÄMPFUNG AN INDUSTRIEROBOTERN FÜR DIE SPANENDE BEARBEITUNG (SDaR II)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**Die Elastizität des Antriebsstrangs limitiert die Genauigkeit von Industrierobotern. In Kombination mit traditionellen Regelungsverfahren, die ausschließlich motorseitige Größen verwenden, führt diese Elastizität zu einer Begrenzung der Bahngenauigkeit, die wiederum entscheidend zur Erschließung neuer Anwendungsbereiche, wie beispielsweise der spanenden Bearbeitung, ist. Moderne Regelungsverfahren in Kombination mit zusätzlicher Sensorik für die Rückführung gelenkseitiger Größen sollen diese Grenzen nun verschieben.**

In der Produktionstechnik besteht zunehmend der Wunsch, neue Anwendungsbereiche für Industrieroboter (IR) zu erschließen. Dies liegt vor allem an dem guten Verhältnis von Investitionskosten zu Arbeitsraum sowie der hohen Anzahl an Freiheitsgraden. Dieser Entwicklung stehen jedoch zwei Nachteile gegenüber: Eine begrenzte Absolutgenauigkeit und eine hohe Schwingungsanfälligkeit. Zur Erschließung neuer Anwendungsgebiete ist der Einfluss ebendieser Faktoren zu verringern.

Im Gegensatz zu Werkzeugmaschinen ist die direkte Positionsregelung bei IR nicht der Stand der Technik. Jedoch existieren aufgrund der steigenden Genauigkeitsanforderungen zunehmend Roboterhersteller, die Manipulatoren mit gelenkseitiger Positionsmessung anbieten. Durch die alleinige Verwendung der gelenkseitigen Positionsmessung für eine direkte Lageregelung wird deren Potential jedoch nicht ausgeschöpft.

**Lösungsansatz:**

Mittels der gelenkseitigen Positionssensorik können auftretende Schwingungen detektiert und wegen der im Vergleich zur Bandbreite der Antriebe vergleichsweise niedrigen mechanischen Eigenfrequenzen bedämpft werden. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der seriellen Kinematik eine Posenabhängigkeit einhergeht. Wird diese im Reglerentwurf nicht berücksichtigt, wie das bei der klassischen P-PI-Kaskadenregelung der Fall ist, geht ein hoher Konservatismus einher.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein modernes Regelungsverfahren, das die klassische P-PI-Kaskadenregelung erweitert, entwickelt. Mit Hilfe eines Unscented Kalman Filter wird auf Basis der gemessenen Position die gelenkseitige Geschwindigkeit geschätzt. Auf Grundlage der geschätzten Gelenkgeschwindigkeit wird eine additive Motorsollgeschwindigkeit berechnet, um die auftretende Schwingung zu dämpfen und damit die dynamische Bahngenauigkeit zu erhöhen. Zur Berücksichtigung der nichtlinearen Roboterdynamik wurde der zunächst mittels einer Linearisierung entworfene, lineare Regelungsansatz durch ein Gain-Scheduling erweitert. Die Sicherstellung der Stabilität und Performanz

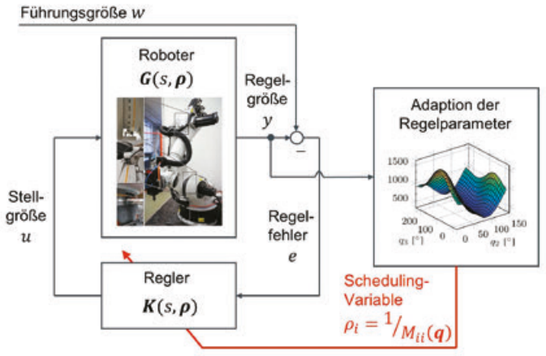



ABB.1: Prinzipschaubild der adaptiven Regelung.

über den gesamten Arbeitsraum stellt eine große Herausforderung dar. Zur Beherrschung dieser Problematik wurde sowohl eine systematische Methode für die Reglerparametrierung als auch den Stabilitätsnachweis entwickelt. In **ABB.1** ist das zugehörige Prinzipschaubild der entwickelten, adaptiven Regelung dargestellt.

Für den Nachweis der praktischen Funktionsfähigkeit des entwickelten Ansatzes steht im Rahmen des Forschungsprojekts ein KUKA KR210-2 IR (siehe **ABB. 2**) zur Verfügung. Dabei handelt sich um einen IR mit klassischer 6-Achs-Knickarmkinematik, der um gelenkseitige Positionssensorik erweitert wurde. Darüber hinaus wurde der IR mit einer selbstentwickelten, offenen Steuerungsplattform ausgestattet, die die praktische Umsetzung des Regelungsansatzes auf industrieller Hardware erlaubt. Anhand von Trajektorienfolgeexperimenten und der Fräsbearbeitung von Testwerkstücken aus Aluminium konnte eine deutliche Verbesserung gegenüber der P-PI-Kaskadenregelung aufgezeigt werden.





**Zusammenfassung und Ausblick**

Die erzielten Ergebnisse zeigen das hohe Potential des entwickelten, adaptiven Regelungsverfahrens für industrielle Robotermanipulatoren mit gelenkseitiger Positionsmessung. Als logischer nächster Schritt sollen die gewonnenen, wissenschaftlichen Erkenntnisse und Ergebnisse in die Anwendung gebracht werden. Des Weiteren soll das Regelungsverfahren dahingehend erweitert werden, dass neben der posenabhängigen Trägheit auch die nichtlineare Gelenksteifigkeit berücksichtigt wird. Es ist bekannt, dass die Gelenksteifigkeit in Abhängigkeit der Gelenktorsion variiert. Da diese über die gelenkseitige Positionssensorik indirekt im Betrieb erfasst wird, soll diese zukünftig ebenfalls einbezogen werden.

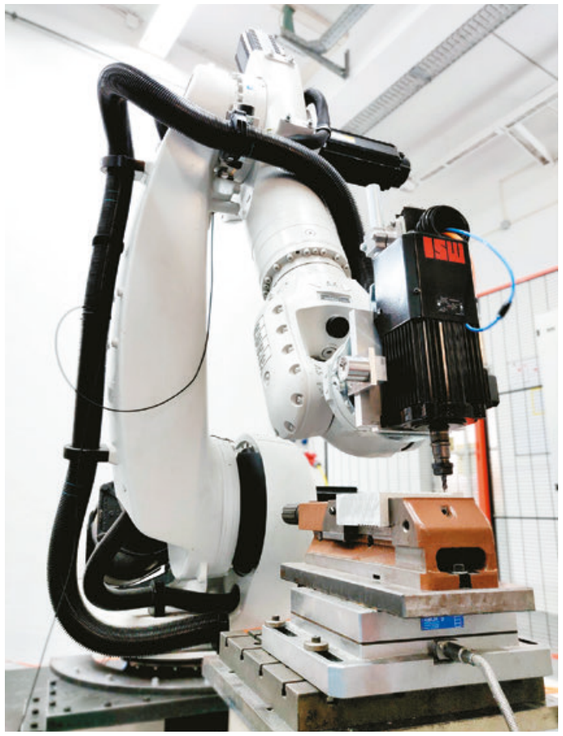


ABB.2: Industrieroboter mit gelenkseitiger Positionssensorik an den ersten drei Gelenken für die experimentelle Evaluation.

**Kontakt:**
Nico Helfesrieder, M.Sc.
nico.helfesrieder@isw.uni-stuttgart.de

LageRegelSeminar

## Lageregelseminar

Auf der zweitägigen Veranstaltung geben unsere Referenten aus Industrie und Forschung einen spannenden Überblick zu aktuellen Forschungsergebnissen und Entwicklungen aus der Robotik, Antriebs- und Maschinentechnik und der Additiven Fertigung. Hierfür werden praxisbezogene experimentelle Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

Weitere Informationen zur Veranstaltung finden Sie unter:

www.lageregelseminar-stuttgart.de

ORGANISATION VERANSTALTER

# STATISCHE, ARBEITSRAUM-ÜBERGREIFENDE ONLINE-KALIBRIERUNG AN KNICKARMROBOTERN MIT INERTIALSENSORIK (RCAL-IMS)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**Im Rahmen dieses Projektes wird ein neuartiges Kalibrierverfahren erforscht, welches an der Roboterstruktur angebrachte Inertialsensoren nutzt, die ohne externe Referenz im gesamten Arbeitsraum einsetzbar sind. Durch Messung der Verkippung des Erdbeschleunigungsvektors soll dabei im Betrieb die Re-Kalibrierung eines elastokinematischen Robotermodells erreicht werden, um die Absolutgenauigkeit des Roboters zu maximieren.**

Industrieroboter (IR) erfreuen sich durch Vorteile wie große Variabilität der Einsatzgebiete und einen großen Arbeitsraum bei moderaten Investitionskosten seit Jahren steigender Beliebtheit. Neben geringer Steifigkeit resultiert aus der seriellen, nichtlinearen Kinematik von IR jedoch auch eine gegenüber Werkzeugmaschinen geringe Absolutgenauigkeit, da sich die Fehleranteile der einzelnen Achsen akkumulieren. Zusätzlich variieren diese Positionsfehler über den Arbeitsraum mit der Pose sowie durch zeitvariante Veränderungen wie Temperaturdrift und Verschleiß.
Für Aufgaben mit hohen Präzisionsanforderungen ist daher eine Kalibrierung unumgänglich. Eine wirtschaftlich dauerhaft einsetzbare Lösung zur Kalibrierung der Endeffektorpose im gesamten Arbeitsraum existiert bisher nicht. Der Stand der Technik der Roboterkalibrierung zeigt, dass bisherige Verfahren entweder an einen bestimmten Ort im Arbeitsraum gebunden sind (kontaktbasierte Verfahren), nur eine Genauigkeit im Millimeterbereich erreichen (kamerabasierte Verfahren), oder sehr teuer sind (Lasertracker) und daher aus Kostengründen nicht dauerhaft am Roboter eingesetzt werden können.

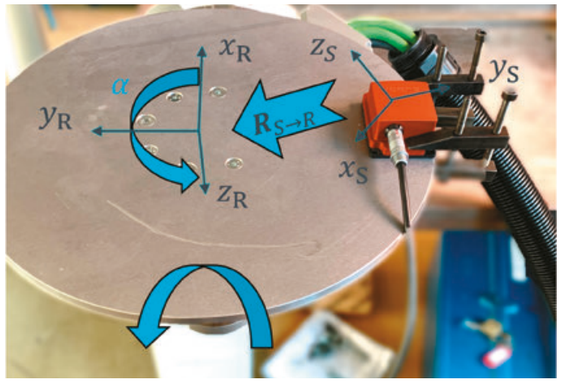



ABB.1: Messaufbau zur Evaluierung der statischen Genauigkeit der Inertialsensorik.

**Ziele:**
Im vorliegenden Projekt wird daher ein neues Kalibrierverfahren erforscht, welches die hauptzeitparallele Kalibrierung im gesamten Arbeitsraum durch mehrere am IR angebrachte Inertialsensoren mit vergleichsweise geringen Anschaffungskosten ermöglichen soll.

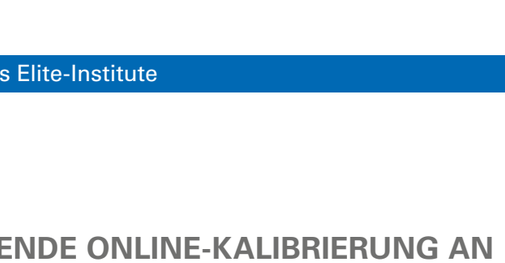



ABB.2: Fehler zwischen angesteuerter und gemessener Rotation. Die Absolutgenauigkeit der verwendeten Präzisionsachse ist zum Vergleich rot markiert.

**Lösungsansatz:**
Bisher werden die Signale von Inertialsensorik gewöhnlich durch zweifache Integration auf Lageebene verwendet, was die Genauigkeit durch Integrationsdrift stark einschränkt. In diesem Projekt wird stattdessen die Verkippung des Erdbeschleunigungsvektors in statischen Betriebsphasen gemessen. Diese wird zur Kalibrierung der Parameter eines elastokinematischen Robotermodells verwendet, um über eine modellbasierte inverse Kinematik die Absolutgenauigkeit zu verbessern und Bahnfehler zu reduzieren. Das Robotermodell enthält dabei neben der Kinematik auch die Gelenkdeformation, die bisher zur Kalibrierung zwar größtenteils unbeachtet bleibt, die allerdings zu Endeffektorfehlern in der Größenordnung von 2 mm führen kann.
Darüber hinaus werden die übrigen, nicht modellierten Restfehler im Betrieb gemessen und iterativ kompensiert, um die Absolutgenauigkeit weiter zu steigern. Die maximal erreichbare Genauigkeitssteigerung am Endeffektor wird im gesamten Arbeitsraum sowohl für die Parameteridentifikation, als auch für die Online-Kompensation der Restfehler simulativ und experimentell mittels Lasertracker validiert.
**Erwartete Ergebnisse:**
Erwartet wird eine kostengünstige Steigerung der absoluten Positionier- und Bahngenauigkeit für Industrieroboter im gesamten Arbeitsraum durch

- Anbringen mehrerer Inertialsensoren
- Berücksichtigen der Steifigkeit in den Robotergelenken
- Kalibrierung des Modells sowie Messung und Kompensation verbleibender, lokaler Restfehler
- Implementierung und experimentelle Validierung am IR

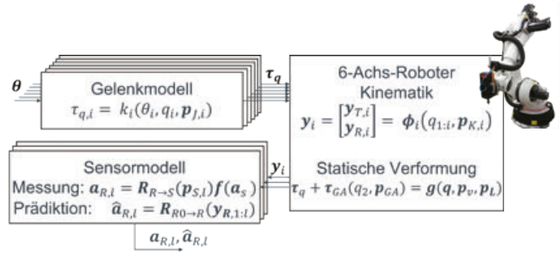



ABB.3: Schematische Darstellung des verwendeten modularen Ansatzes zur Modellierung.

ABB.4: Validierung der Endeffektor-Genauigkeit (3) des Roboters (1) mittels Lasertracker (2).

**Kontakt:**
Christoph Hinze, M.Sc.
christoph.hinze@isw.uni-stuttgart.de

# TOPOLOGISCH OPTIMIERTE BAUTEILE FÜR GENERATIVE FERTIGUNGSVERFAHREN (TopGen I-III)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**In diesem Forschungsprojekt wird eine ganzheitliche Methodik zur Modellierung und Fertigung von im Innern optimierten Bauteilstrukturen entwickelt. Dazu wird das schichtweise Fertigungsverfahren Layer Laminated Manufacturing (LLM) genutzt, das durch Fügen einzelner, zusammenhängender Schichten gekennzeichnet ist. Die individuell strukturierten Stahlbleche werden mit hochfesten Epoxid-Klebstoffen verklebt und bilden so eine optimierte Bauteil-Innenstruktur. Erste praxisnahe Validierungen zeigen hohes Potenzial für Leichtbau und gesteigerte Strukturdämpfung.**

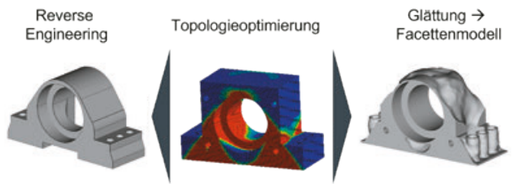



ABB.1: Die Ergebnisse der Topologieoptimierung (mittig) werden bisher meist in Form eines geglätteten Facettenmodells (rechts) exportiert oder von erfahrenen Ingenieuren in konventionell fertigbare Strukturen überführt (links).

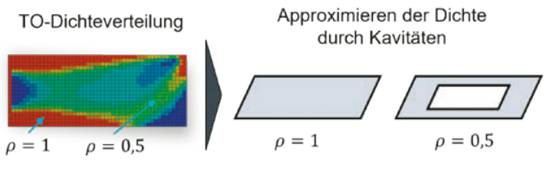



ABB.2: Grundidee – Approximieren der in der TO ermittelten Materialdichten durch Strukturierung und Einbringen von Kavitäten.

Leichtbau gilt für viele Branchen (z.B. Automobil, Luft- und Raumfahrt etc.) als eine Schlüsseltechnologie für Energie- und Ressourceneffizienz. Die Topologieoptimierung (TO) ermittelt – meist numerisch auf Basis einer FE-Simulation – die bestmögliche Materialverteilung in einem gegebenen Bauraum unter spezifischen Randbedingungen – und stellt damit ein wichtiges Werkzeug für den Leichtbau dar. Die aus der TO resultierenden Bauteilstrukturen sind meist sehr komplex und häufig nicht ohne Weiteres konventionell fertigbar. Aus diesem Grund werden entweder kostenintensive additive Fertigungsverfahren verwendet, oder erfahrene Ingenieure leiten aus der TO konventionell fertigbare, aber weniger optimale Bauteile ab (**ABB. 1** links). Da additiv gefertigte, metallische Maschinenkomponenten in der Regel nicht wirtschaftlich hergestellt werden können, ist der Einsatz von TO im Maschinenbau bislang sehr begrenzt.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es daher, eine ganzheitliche Methodik zur automatischen Modellierung und Herstellung strukturoptimierter, metallischer Bauteile zu entwickeln. Auf diese Weise soll der wirtschaftlich vertretbare Einsatz strukturoptimierter Bauteile vor allem auch dem Maschinen- und Anlagenbau zugänglich gemacht werden.

Der bereits in zwei Förderperioden erforschte Lösungsansatz beruht auf den Gestaltungsfreiheiten des schichtweisen, Layer Laminated Manufacturing (LLM) Verfahrens, bei dem einzelne Schichten zuerst individuell strukturiert und anschließend zu einem dreidimensionalen Modell gefügt werden.

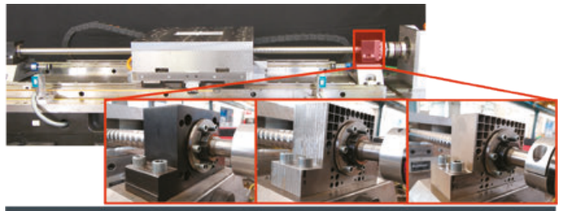
**Grundidee: Innere Optimierung**

Die Grundidee ist es, mit der Strukturierung einzelner Schichten die in der TO ermittelten Materialdichten zu imitieren (**ABB. 2**). Durch die spezielle Eignung des LLM-Verfahrens zur Herstellung geschlossener Hohlräume kann auch von einer inneren Optimierung (**ABB. 4** rechts) der Bauteile gesprochen werden.

Die entwickelte Methodik umfasst dabei alle Schritte vom Import der TO-Ergebnisse über die Modellierung der strukturierten Bauteilschichten, bis zur Fertigung des Bauteils durch Fügen der einzelnen Schichten – in diesem Fall durch Verkleben von Stahlblechen mit hochfestem 2-Komponenten-Epoxidklebstoff.

Die Strukturierungsalgorithmik (**ABB. 4** links) generiert auf Basis von User-Eingaben und Randbedingungen der Fertigung (z.B. minimaler Radius, minimale Stegbreiten etc.) einzelne Bauteilschichten, die anschließend mit gleichförmigen virtuellen Gittern diskretisiert werden. Diese stellen die Designräume dar, innerhalb derer durch 3D-Interpolation eine Dichte aus der TO ermittelt wird. Die gewünschte Dichte wird dann durch Entfernen einer proportionalen Menge an Material in Form von Kreisen und Quadraten (mit abgerundeten Ecken) modelliert. Im Rahmen simulativer Parameterstudien wurden die besten Parameterkombinationen zur Optimierung eines Praxisbeispiels – dem Lagerbock einer Vorschubachse – ermittelt.

Zur praktischen Validierung wurde der Lagerbock entsprechend modelliert und anschließend durch Verkleben von Stahlblechen hergestellt. Um zusätzlich die Einflüsse der Klebeschichten zu validieren, wurde ein zum LLM identischer Lagerbock im Selective Laser Melting (SLM) Verfahren 3D-gedruckt und ebenfalls untersucht. Die experimentellen Ergebnisse (**ABB. 3**) zeigen, dass der LLM-Lagerbock im direkten Vergleich mehr Leichtbaupotenzial bietet, aber auch eine reduzierte Steifigkeit gegenüber dem Vollmaterial-Lagerbock aufweist. Der Steifigkeitsverlust konnte somit im Wesentlichen den Klebeschichten zugeordnet werden. Bemerkenswert ist auch die enorme Steigerung der Strukturdämpfung um Faktor 10 beim LLM-Lagerbock gegenüber dem Lagerbock aus Vollmaterial (Referenz).



| | Referenz | LLM | SLM |
|---|---|---|---|
| Masse [g] | 5450 | 3480 (-36,2 %) | 3946 (-27,6 %) |
| Eigenfrequenz [Hz] | 4771 | 2734 (-42,8 %) | 3618 (-24,2 %) |
| Dämpfungsmaß [-] | 0,091 | 1,02 (+1020 %) | 0,32 (+252 %) |

ABB.3: Am Vorschubachsen-Prüfstand eingebaute Lagerböcke und ausgewählte Ergebnisse der Untersuchungen.

**Ausblick**

Nachdem die grundsätzliche Anwendbarkeit der Methodik in zwei Förderperioden an einem Praxisbeispiel erfolgreich nachgewiesen wurde, sollen nun verbleibende Forschungsfragen geklärt werden.

Zum einen ist bisher nicht bekannt, wie die Bauteileigenschaften verklebter LLM-Bauteile von den wesentlichen Designparametern (Schichtdicke, Schichtaufbaurichtung, Klebstoff) abhängen und wie die resultierende Anisotropie gezielt eingesetzt werden kann.

Zum anderen soll die bislang gleichförmige Diskretisierung und Strukturierung der Schichten intelligenter gestaltet werden, indem die Informationen der TO bereits zur Diskretisierung genutzt werden. Konkret sollen durch Clustering-Algorithmen zusammenhängende Dichtebereiche erkannt werden, um darauf angepasste Kavitäten zu erzeugen und somit das Leichtbaupotenzial zu maximieren.

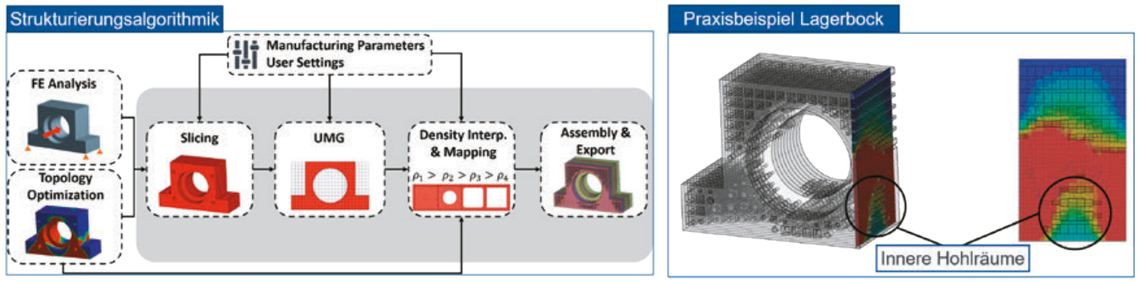



ABB.4: LLM-Strukturierungsalgorithmik (links) mit gleichförmiger Diskretisierung (Uniform Manufacturing Grid, UMG) und Verdeutlichung der fertigbaren inneren Hohlräume am Praxisbeispiel Lagerbock (rechts).

**Kontakt:**
Nico Helfesrieder, M.Sc.
nico.helfesrieder@isw.uni-stuttgart.de

# OPTIMALE KONTAKTKRAFTSCHÄTZUNG BEI INDUSTRIEROBOTERN FÜR MECHANISCHE FERTIGUNGSARBEITEN

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**In der modernen industriellen Fertigung spielen Industrieroboter eine zentrale Rolle bei der Automatisierung von Prozessen. Eine wichtige Anforderung für eine erfolgreiche Ausführung von mechanischen Fertigungsaufgaben durch Roboter ist die Fähigkeit mit der Umgebung interagieren zu können. Für diese Interaktion ist aufgrund der begrenzten Planungs- und Absolutgenauigkeit oftmals eine Kraftregelung erforderlich. Diese Regelung benötigt wiederum die Kontaktkraft in Echtzeit, wofür Kraft-/Momentensensoren eingesetzt werden. Da diese zusätzliche Sensorik sowohl zu höheren Kosten als auch zu einer höheren Ausfallwahrscheinlichkeit führt, ist es wünschenswert, sie durch eine Schätzung der Kontaktkraft zu ersetzen.**

Bei industriellen, mechanischen Fertigungsarbeiten (wie z.B. Polieren, Schleifen, Entgraten) mit Robotermanipulatoren muss der Endeffektor des Manipulators mit der Umgebung interagieren. Die Interaktion mit der Umgebung gibt über die Kontaktgeometrie eine harte Beschränkung für den geometrischen Pfad des Endeffektors vor. Trotz Werkstückeinmessung und Prozessplanung in einer geschlossenen CAD-CAM-NC-Kette können die auftretenden Prozess-/Kontaktkräfte nur mit begrenzter Genauigkeit vorgesagt werden (Bauteiltoleranzen, Nachgiebigkeit der Roboterstruktur, Temperaturverhalten etc.). Infolgedessen reicht eine reine Positionsregelung für anspruchsvolle Prozesse oftmals nicht aus, weshalb Kraftregelungen zum Einsatz kommen.

Für solche Regelungsstrukturen kommen Kraft-/Momentensensoren (F/T-Sensoren) zum Einsatz. Diese werden typischerweise zwischen dem Handgelenk und dem Endeffektor montiert. Problematisch hierbei ist, dass die zusätzliche Sensorik die Systemkomplexität erhöht, was sowohl die Kosten als auch das Ausfallrisiko steigert. Das Nachrüsten des Messsystems und die Einbindung in die Steuerung ist dabei mit erheblichem Aufwand und Kosten verbunden.

Eine Alternative zu diesen F/T-Sensoren stellt die Rekonstruktion der Kontaktkraft aus vorhandenen Messsignalen dar. Eine große Herausforderung dabei ist, dass die Kontaktkraft nur dann ausreichend genau geschätzt werden kann, wenn ein Effekt in den Motorsignalen sichtbar ist. Dies führt insbesondere zu einer Abnahme der Güte der Rekonstruktion, wenn einzelne Gelenke aufgrund der Haftreibung stillstehen.

Seit wenigen Jahren bieten Roboterhersteller (wie z.B. Fanuc, Mabi Robotic) Industrieroboter für mechanische Fertigungsarbeiten an, die sowohl motor- als auch gelenkseitige Positionserfassung besitzen. Die neuerdings verfügbare gelenkseitige Positionsmessung in Kombination mit den aktuellen Entwicklungen der theoretischen Regelungstechnik versprechen eine Verbesserung der Kontaktkraftschätzung gegenüber dem Stand der Technik.

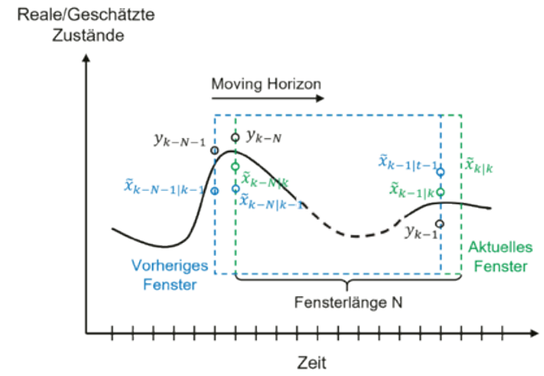



ABB.1: Grundkonzept des MHE-Verfahrens.

**Lösungsansatz**:

Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll eine optimale Kontaktkraftschätzung auf Basis des Moving-Horizon-Ansatzes und der neuerdings verfügbaren gelenkseitigen Positionsmessung erforscht werden. Die Methode zeichnet sich im Gegensatz zum Stand der Technik dadurch aus, dass nicht nur der Momentanwert, sondern ein längeres Zeitfenster der Signale zur Zustandsschätzung verwendet wird, wodurch eine bessere und robustere Schätzung erzielt werden kann. Moving-Horizon-Beobachter (MHE) basieren auf der Idee, ein Kostenfunktional zu minimieren, das auf Basis eines gleitenden Fensters mit einer endlichen Anzahl von Zeitschritten definiert ist (vergleiche **ABB. 1)**.

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde ein Moving-Horizon-Beobachter (MHE) für ein Robotergelenk hergeleitet und innerhalb eines detailgetreuen, abgeglichen Simulationsmodells eines KUKA KR-210-2 in MATLAB/Simulink implementiert. Hierfür wurde der IPOPT-Solver (Inneres-Punkte-Verfahren) von CasADi (CasADi ist ein Open-Source-Tool für nichtlineare Optimierung und algorithmische Differenzierung) eingebunden und der MHE als Simulinkblock umgesetzt.

Zur Validierung der Performanz der entwickelten Kontaktkraftschätzung wurde ein ruckbegrenztes Geschwindigkeitsprofil im Gelenkraum für das erste Gelenk vorgegeben und während der Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit ein kartesischer Kontaktkraftsprung eingeprägt. In **ABB. 2** sind die zugehörigen Verläufe der realen und geschätzten Größen für die gelenkseitige Position, die gelenkseitige Geschwindigkeit, die gelenkseitige Motordrehzahl, sowie das externe Störmoment für den MHE und einen Unscented Kalman Filter (UKF) (Stand der Technik) dargestellt. Die simulativen Voruntersuchungen haben gezeigt, dass das neue Verfahren in der Lage ist, die Kontaktkraft mit vergleichsweise hoher Bandbreite zu schätzen. Die Ergebnisse motivieren eine detaillierte Untersuchung des Verfahrens.

**Ausblick**

Eine zentrale Herausforderung für die praktische Umsetzung auf einer industriellen Steuerung stellt die Lösung des optimalen Beobachtungsproblems unter Echtzeitbedingungen dar. Deshalb soll zukünftig zunächst untersucht werden, welches Prädiktionsmodell (u.a. Reibungsmodellierung) und welche Optimierungsmethode unter Berücksichtigung der Rechenkomplexität und Schätzgüte verwendet werden soll. Darüber hinaus ist aufgrund der Vielzahl an Einstellparametern eine systematische Einstellmethode zu entwickeln, bevor anschließend eine Übertragung des Verfahrens auf mehrachsige Industrieroboter und die Validierung innerhalb eines mechanischen Fertigungsprozesses (wie z.B. Schleifen) erfolgen soll.

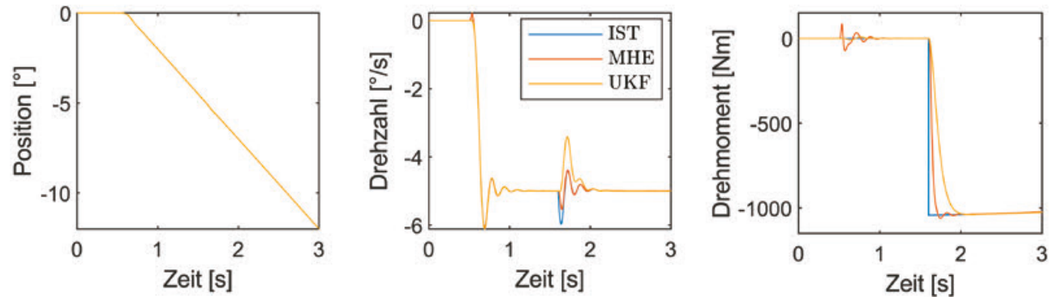



ABB.2: Performanz des entwickelten MHE für einen Kontaktkraftsprung.

**Kontakt:**
Nico Helfesrieder, M.Sc.
nico.helfesrieder@isw.uni-stuttgart.de

# SENSORLOSE HYSTERESEKOMPENSATION VON INDUSTRIEROBOTERN (HyComp)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**Aufgrund der stetig steigenden Genauigkeitsanforderungen ist das Ausreizen der Grenzen der erreichbaren Bahngenauigkeit nach wie vor ein wichtiges Thema in der Industrierobotik. Durch die Steigerung der Bahngenauigkeit besteht die Hoffnung, neue Anwendungsgebiete zu erschließen. Ein möglicher Lösungsansatz besteht darin, hochgenaue Getriebemodelle in die Steuerung zu integrieren. Dies wirft die Frage auf, welche Genauigkeit mit solchen Ansätzen erzielt werden kann.**

Seit langem ist bekannt, dass die in den Robotergelenken verbauten Getriebe, einen großen Einfluss auf die erzielbare Positionier- und Bahngenauigkeit haben. Wegen der hohen Anforderungen an Wirkungsgrad, Genauigkeit, Bauraum und Beschleunigungsvermögen werden in der Industrierobotik überwiegend Harmonic Drive und Zykloidgetriebe verbaut. Aufgrund des Funktionsprinzips von Zykloidgetrieben - Wälzkontakt anstelle eines Zahneingriffs - werden diese vor allem in Industrierobotern mit hohen Traglasten und Harmonic Drive in Leichtbauroboter eingesetzt. Beide Getriebearten haben jedoch gemeinsam, dass aus dem Zusammenspiel von Reibung und Elastizität ein unerwünschtes Hystereseverhalten entsteht, das sich negativ auf die erzielbare Genauigkeit auswirkt.

Bei den meisten Robotern sind aus Kostengründen jedoch lediglich Encoder auf der Motorseite integriert, womit die auftretenden Getriebefehler messtechnisch nicht erfasst werden können. Ist eine Integration eines zweiten Encoders auf der Getriebeausgangsseite nicht erwünscht, besteht die Möglichkeit, mittels hochgenauen Modellen Fehler zu prädizieren und steuerungstechnisch zu kompensieren.

**Lösungsansatz:**

Der vorgeschlagene Lösungsansatz basiert auf der Modellierung und Invertierung des Hystereseverhaltens. Da der Zustand des Getriebes unter anderem vom Getriebemoment und damit von der Belastung abhängt, ist sowohl ein Modell des Hystereseverhaltens als auch ein Beobachter für die Belastung notwendig. Um aus den Motorgrößen Strom und Position auf die Belastung schließen zu können, ist zusätzlich ein Modell der nichtlinearen Roboterdynamik inklusive Reibung notwendig. Messtechnische Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Reibungsmodellierung sowohl eine Last- als auch Temperaturabhängigkeit zu berücksichtigen ist.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde zur experimentellen Untersuchung des entwickelten Lösungsansatzes ein Versuchsaufbau realisiert. Der Versuchsaufbau, der in **ABB. 1** dargestellt ist, dient der Nachbildung eines Robotergelenks der hohen Traglastklasse. Bei dem zur Untersuchung herangezogenen Getriebe handelt es sich um das Zykloidgetriebe RH380-N von Nabtesco mit einem Nenndrehmoment von 3,7 kNm und einer Untersetzung von 185.

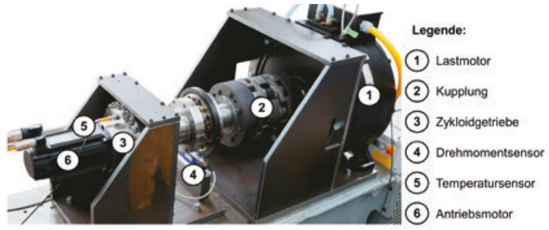



ABB.1: Versuchsaufbau zur experimentellen Untersuchung.

Eine Besonderheit des Prüfstands ist, dass das Getriebe nicht lediglich durch eine Trägheit oder Bremse belastet wird, sondern über einen Torque-Motor ein dynamisches Lastmoment aufgebracht werden kann. Zur messtechnischen Untersuchung ist der Versuchsstand darüber hinaus auf der Abtriebsseite mit einem Drehmomentsensor und einem Encoder ausgestattet. Die Ansteuerung erfolgt über ein Rapid-Prototyping-System von Speedgoat, das mit den Antriebsreglern, auf denen die Stromregelung ausgeführt wird, und den zusätzlichen Messsystemen über einen EtherCAT-Bus mit einer Taktfrequenz von 2 kHz kommuniziert.

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Hysterese zusätzlich zum Getriebemoment eine nicht unwesentliche Abhängigkeit von der Temperatur aufweist. Diese Abhängigkeit entspricht einer Versteifung des Getriebes, die mittels der Materialausdehnung erklärt werden kann. Für andere hysteresebehaftete Systeme, wie z.B. Piezoaktoren, ist darüber hinaus bekannt, dass die Hysterese ihre Form mit der Frequenz ändert. Eine solche Abhängigkeit konnte für das untersuchte Zykloidgetriebe jedoch nicht festgestellt werden.

Zur Demonstration der mit einem mathematischen Modell (Bouc-Wen Modell) erzielbaren Abbildungsgenauigkeit sind in **ABB. 2** sowohl das gemessene als auch das mit dem Modell prädizierte Hystereseverhalten für eine Getriebetemperatur von 50 °C dargestellt. Dabei wurden mehrere Hystereseschleifen durchlaufen, indem mittels des Torque-Motors ein alternierendes Lastmoment mit ansteigender Amplitude aufgebracht wurde. Anhand der Abbildung ist ersichtlich, dass mit dem Modell auch innere Hystereseschleifen hochgenau abgebildet werden können.

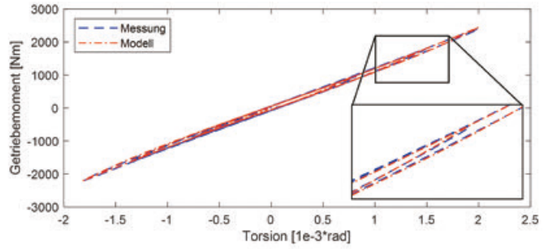



ABB.2: Gemessenes und identifiziertes Hystereseverhalten des Zykloidgetriebes.

**Verbesserungspotential**

Um das Potential einer sensorlosen Kompensation aufzuzeigen, wurden an dem Versuchsstand verschiedene, anwendungsnahe Szenarien durchgeführt. Mit Hilfe des vorhandenen Torque-Motors können neben Prozesskräften auch die durch die Roboterdynamik entstehenden Kopplungsmomente simuliert werden. In **ABB. 3** ist der Regelfehler mit und ohne Kompensation für ein Beispielszenario dargestellt. Mittels des Torque-Motors wurde während der Bewegung des Antriebs ein, durch die Gravitation entstehendes Lastmoment, das beispielweise am zweiten Gelenk auftreten würde, nachgebildet. Es ist ersichtlich, dass auftretende Regelfehler mit Hilfe des sensorlosen Kompensationsansatzes signifikant reduziert werden können.

Die Ergebnisse zeigen das Potential von sensorlosen Ansätzen zur Genauigkeitssteigerung. Jedoch werden hochgenaue und komplexe Modelle mit einer Vielzahl Modellparameter benötigt. Zukünftig soll der Lösungsansatz auf einen 6-Achs-Roboter übertragen werden, um das Verbesserungspotenzial anhand eines realen Prozesses zu veranschaulichen.

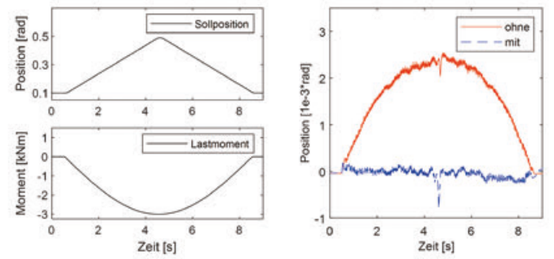



ABB.3: Vergleich des Regelfehlers ohne (rot) und mit (blau) Kompensation für das links dargestellte Beispielszenario.

**Kontakt:**
Nico Helfesrieder, M.Sc.
nico.helfesrieder@isw.uni-stuttgart.de

# ENTWICKLUNG EINES ADAPTIERBAREN FERTIGUNGSVERFAHRENS FÜR MODULARE, LEICHTE BETONBAUTEILE MITTELS VOLL-REZYKLIERBAREN SCHALUNGSSYSTEMEN

**GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG) IM RAHMEN DES SCHWERPUNKTPROGRAMMS „ADAPTIVE MODULBAUWEISEN MIT FLIESSFERTIGUNGSMETHODEN – PRÄZISIONSSCHNELLBAU DER ZUKUNFT (SPP 2187)“**

**Dieses Forschungsprojekt befasst sich mit der Fertigung leichter Betonbauteile durch Integration aktueller Fließfertigungsmethoden in die Bauindustrie. Hierbei werden mittels additiv gefertigter wasserlöslicher Sandschalungen filigrane Betonmodule gegossen. Das Schalungsmaterial wird anschließend recycelt und kann erneut verwendet werden. Eine steuerungstechnische Herausforderung stellt insbesondere die Synchronisation des verwendeten Druckkopfs mit seinen 32 separaten Düsen und den Vorschubsachsen dar.**

ABB.1: Leichtbau im Bauwesen – Strukturoptimierter Einfeldträger (mittig) aus Sandschalungssegmenten (links) und deren Rohmaterialien Sand, Wasser, Dextrin (rechts) (Bildquelle ILEK, Uni Stuttgart).

Aufgrund des Bevölkerungswachstums und der gleichzeitig zunehmenden Verknappung der natürlichen Ressourcen, steht die Bauwirtschaft vor der Herausforderung das Bauvolumen zu erhöhen und den Materialverbrauch zu reduzieren. Um dieser Herausforderung zu begegnen, ist es notwendig die Bauprozesse zu beschleunigen, die Effizienz der Bauteilkomponenten zu erhöhen und Bauabfälle zu vermeiden. Das Schwerpunktprogramm (SPP 2187) startete Anfang 2020 mit einer Gesamtlaufzeit von 6 Jahren. Hier werden Methoden zum schnelleren, präziseren und ressourcenschonenderen Bauen mit Betonbauteilen entwickelt. Die Kernidee ist es die aus der Produktionstechnik bekannte Fließfertigung mit den Entwurfs- und Herstellungskonzepten des konstruktiven Ingenieurbaus zu vereinen. Daran arbeitet das ISW in einem Kooperationsprojekt mit dem Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) der Universität Stuttgart zusammen mit rund 50 Forschern aus ganz Deutschland.
Im Rahmen des SPP befasst sich dieses Teilprojekt mit der Konzeption und Umsetzung eines automatisierten Fertigungsprozesses, mit welchem sich strukturoptimierte leichte Betonbauteile herstellen lassen. Für geometrisch komplexe Strukturen wären herkömmliche Holz- oder Styrodurschalungen sehr teuer und nicht wiederverwertbar. Deshalb werden alternative Herstellungsmethoden von Schalungssystemen für den Betonguss betrachtet. Der Fokus liegt dabei auf der Integration der Additiven Fertigung von rezyklierbaren Schalungen in die Fließfertigungskette.
Die Kombination aus additiver Fertigung zusammen mit abfallfreien, wasserlöslichen Materialsystemen wird als vielversprechende Alternative für die konventionelle Schalungsproduktion angesehen. Der Herstellprozess basiert auf der Pulverbett-Bindemittelaktivierung und erfolgt durch das Aufspritzen von Wasser auf ein Gemisch aus Sand und wasserempfindlichem Bindemittel, welches nach seiner Aushärtung eine geometrisch stabile Form erhält (**ABB. 2**).
In gewissem Umfang ermöglicht das Pulverbettverfahren auch die Integration weiterer Fertigungsschritte. Hierzu zählen unter anderem eine automatisierte Bewehrungsintegration und einen Einbau von Verbindungselementen. Um den erläuterten Fertigungsprozess zu gewährleisten sind diverse





Einzelkomponenten zu entwerfen. Dies beinhaltet die Entwicklung des kinematischen Systems, der Komponenten des Materialversorgungs- und des Verarbeitungssystems sowie Endeffektoren für die Integration von Bewehrung und Verbindungselemente. Für eine qualitätssichernde Prozesssteuerung werden ein modulares, offenes Steuerungssystem sowie Online-Regelungsverfahren zur dynamischen Anpassung der Prozessparameter entwickelt.

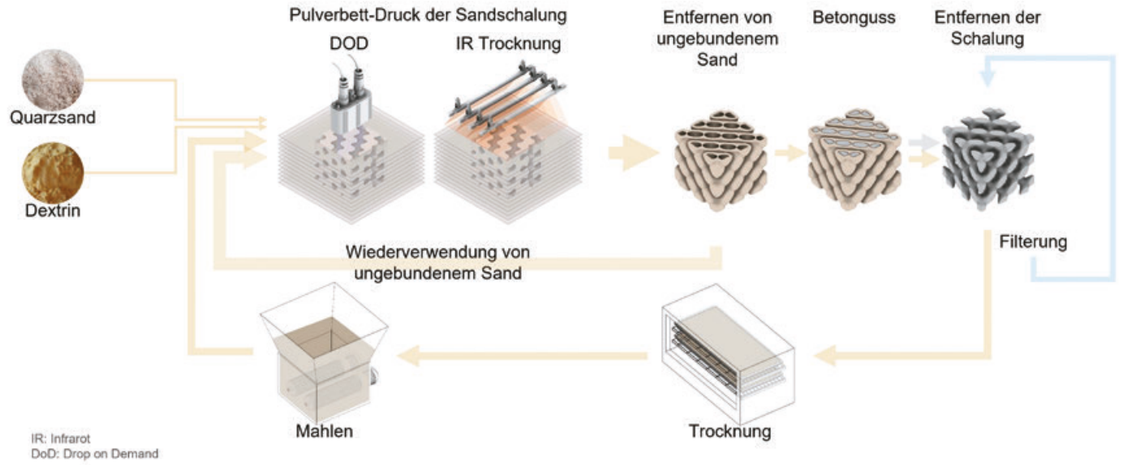



ABB.2: Additiver Fertigungsprozess voll-rezyklierbarer Sandschalungen mittels selektiver Bindemittelaktivierung (Bildquelle ILEK, Uni Stuttgart).

**Projektpartner:**

ILEK

SPP 2187 Schnellbau der Zukunft

**Kontakt:**
Maximilian Nistler, M.Sc.
maximilian.nistler@isw.uni-stuttgart.de

Universität Stuttgart
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen

**Wir steuern Zukunft: Innovativ. Interdisziplinär. Wissenschaftlich.**

Das breite Forschungsspektrum des Instituts bietet stets interessante Themen zur Auswahl, wobei ständig eine Vielzahl konstruktiv, experimentell und theoretisch orientierter Aufgabenstellungen vorliegt.

Studierende aller Studiengänge, in deren Prüfungsordnung eine studentische Arbeit im Bereich der Ingenieurwissenschaften vorgesehen ist, können diese am ISW anfertigen, insbesondere Studierende des Maschinenbaus, der Mechatronik, der Technischen Kybernetik und des Technologiemanagements.

Immer aktuelle Themen finden Sie unter:
**https://www.isw.uni-stuttgart.de/lehre/studentische-arbeiten/**

**Bachelor-, Studien-, Masterarbeiten**
**zu vergeben**

ISW

# IDENTIFIKATION UND KOMPENSATION ELEKTROMECHANISCHER EIGENSCHAFTEN VON SEILTRIEBEN FÜR PARALLELE SEILROBOTER (IKEPA)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**Die Möglichkeit Seile zu aktuieren ist auf wenige Antriebsprinzipien begrenzt. Die Bewegungsübertragung erfolgt über eine spezielle Form der Zugmittelgetriebe – einem Seiltrieb. Seiltriebe kommen in vielen Anwendungsbereichen, bspw. Krananlagen, Schachtförderanlange oder auch speziellen Seilrobotern, zum Einsatz. Durch die Verwendung von Kunststofffaserseilen sowie die Aktuierung mit hochdynamischen nichtlinearen Bewegungs- und Lastprofilen, entstehen unbekannte Störeffekte, die zu erheblichem Schlupf führen. Für die Untersuchung dieser Effekte wurde am ISW ein spezieller Verspannungsversuchsstand mit Kraft- und Linearmesssensorik aufgebaut. Ziel des Forschungsvorhabens ist die dabei die Identifikation und Modellierung dieser Störeffekte, um diese während der Seilaktuierung modellbasiert zu kompensieren.**

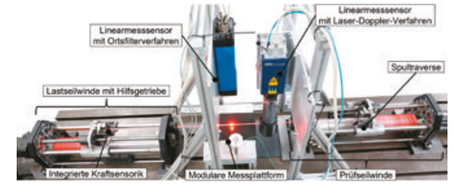



ABB.1: Seilwindenprüfstand.

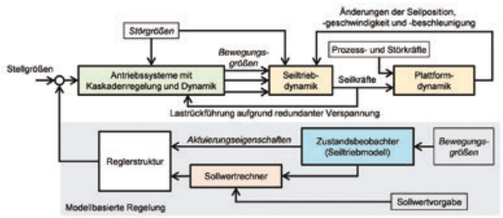



ABB.2: Regelkonzept zur Störgrößenkompensation.

Parallele Seilroboter eignen sich speziell für Anwendungen, die einen großen Arbeitsraum, hochdynamische Bewegungen oder eine hohe Nutzlast erfordern. Aufgrund der geringen Eigenmasse der Kunststofffaserseile und Plattform können Seilroboter als Leichtbauform der Gough-Stewart-Plattform beschrieben werden. Verglichen mit seriellen Robotern besitzen konventionelle parallele Roboter bereits ein hohes Traglast-Eigenmasse-Verhältnis, welches ein paralleler Seilroboter um einige Größenordnungen zugunsten der Traglast verbessert. Die Anforderungen von parallelen Seilrobotern, große Arbeitsräume, hohe Traglasten bei gleichzeitig hohen Geschwindigkeiten, Genauigkeiten und hoher Energieeffizienz zu erzielen, sind gegensätzlich. Aufgrund dieser Gegensätze werden parallele Seilroboter bisher nur in wenigen industriellen Bereichen eingesetzt. Die Manipulation der Seilroboterplattform erfolgt über Seile, die mit Seilaktuierungssystemen angetrieben werden. Dabei beeinflusst das Aktuierungsverhalten maßgeblich die Betriebseigenschaften eines parallelen Seilroboters. Beispielsweise geht aus dem Stand der Forschung hervor, dass Fehler bei der Plattformpositionierung anteilig auf entstandenen Schleppfehler an den Seiltrieben zurückzuführen sind.
Durch komplexe Zusammenhänge zwischen den mechanischen, elektronischen und thermischen Teilsysteme kommt es bei Seiltrieben, mit der Verwendung von Kunststofffaserseilen als Zugmittel, zu nichtlinearen Betriebseigenschaften. Es entstehen Störeffekte während des Betriebs eines parallelen Seilroboters, welche aktuell nur durch aufwendige Regelverfahren mit entsprechenden Messsystemen am Seiltrieb und der Plattform ausgeglichen werden können.
Im Rahmen des geplanten Forschungsvorhabens sollen daher die elektromechanischen Eigenschaften von Seiltrieben für parallele Seilroboter mit Kunststofffaserseilen identifiziert werden. Mit den Ergebnissen können daraufhin modellbasierte Regelverfahren entworfen und umgesetzt werden, mit welchen es möglich ist, Störeffekte, ohne zusätzliche Sensorik, zu kompensieren und somit die Genauigkeit, Energieeffizienz und das Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvermögen von Seilrobotern zu steigern.

**Kontakt:**
Thomas Reichenbach, M.Sc.
thomas.reichenbach@isw.uni-stuttgart.de





# SYSTEMATIC COMPONENT-ORIENTED LANGUAGE REUSE (SCOLaR)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**Im Forschungsprojekt SCOLaR wird eine neuartige Methode für die systematische Wiederverwendung von textuellen, externen domänen-spezifischen Sprachen (DSLs) entwickelt. DSLs werden darin als Sprachkomponenten an Hand einer Produktlinie von Sprachen wiederverwendet. Sprachkomponenten bieten dazu ein explizit definiertes Interfaces über das die enthaltenen Sprachen miteinander komponiert werden können. Damit können Sprachentwickler und Domänenexperten von neuen DSLs profitieren, die durch die Komposition von vorhandenen DSLs erzeugt werden.**

Die Digitalisierung erfordert, dass auch Domänenexperten immer häufiger Software entwickeln müssen.
Um die Kluft zwischen dem domänen-spezifischem Problemraum und dem technischen, nur für Softwareexperten verständlichen, Lösungsraum zu schließen, haben sich Modelle als nützlich erwiesen. Für die formale Beschreibung der Modelle werden domänen-spezifische Sprachen (Domain-Specific Languages, DSLs) verwendet. Diese werden allerdings häufig ad-hoc, ohne Wiederverwendung, und in geringer Qualität für einen Einsatzzweck entwickelt.
In diesem Projekt soll daher eine neuartige Methode zur Wiederverwendung von DSLs entstehen, die es ermöglicht, DSLs innerhalbe einer Produktlinie, der sogenannten Sprachfamilie, darzustellen und wiederzuverwenden. Grundlage dafür sind komponierbare Sprachkomponenten, die ein explizites Interface für Wiederverwendung bieten. Mit Hilfe dieser Sprachkomponenten soll die Wiederverwendung außerdem unabhängig von technologischen Räumen bestimmter Language Workbenches möglich sein. Dafür müssen die Komponenten von den konkreten Implementierungen der Konstituenten von DSLs abstrahieren.
Unterschiedliche Language Workbenches bieten außerdem unterschiedliche Arten der Sprachkomposition an. So gibt es beispielsweise Spracheinbettung, die es ermöglicht, eine DSL in eine andere einzubetten und somit DSLs innerhalb eines Modellartefakts zu nutzen, oder Sprachaggregation, wo die Modelle der beiden komponierten DSLs getrennt weiterexistieren, jedoch eine Verbindung zwischen Modellelementen hergestellt wird. Zuletzt soll eine Methodik zur systematischen Wiederverwendung an Hand dieser Komponenten innerhalb von Sprachfamilien entwickelt werden. Damit wird eine neuartige Möglichkeit der DSL Wiederverwendung geschaffen von der Sprachentwickler und Domänenexperten profitieren.

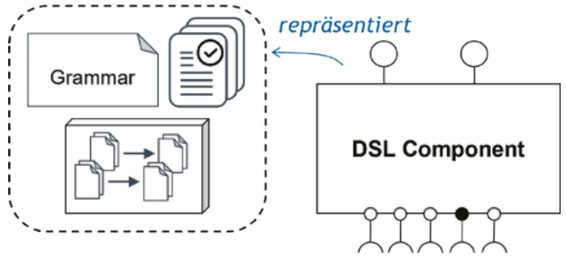



ABB.1: Sprachkomponenten repräsentieren DSLs und ihre Bestandteile als Black-box.

**Kontakt:**
Jérôme Pfeiffer, M.Sc.
jerome.pfeiffer@isw.uni-stuttgart.de

# ERWEITERUNG DES MULTI-SKALEN-NETZWERK-MODELLS ZUR VIRTUELLEN INBETRIEBNAHME KOMPLEXER MATERIALFLUSSSYSTEME (FlowVC)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**In diesem Forschungsprojekt wird ein makroskopisches Flussmodell zur Materialflusssimulation weiterentwickelt und dessen Einsatzbereich erweitert. Anschließend wird das makroskopische Flussmodell mit einem physikbasierten Modell zu einem Multi-Skalen-Netzwerk-Modell gekoppelt, wobei sowohl die Modellerstellung als auch die Ausführung in der Simulation berücksichtigt wird. Das Ziel des Multi-Skalen-Netzwerk-Modells ist der Einsatz in der Virtuellen Inbetriebnahme von materialflussreichen Produktionsanlagen.**

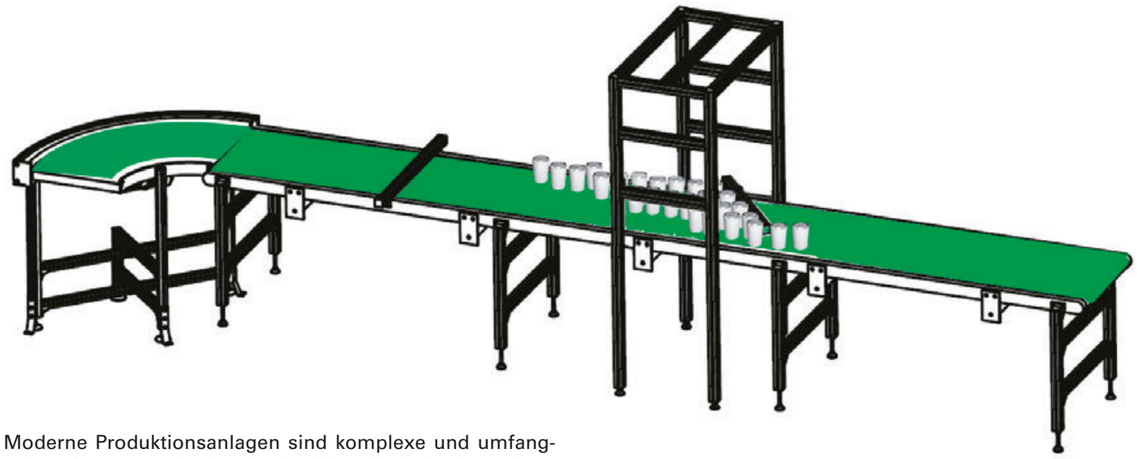


ABB.1: Beispielhaftes Förderband mit Materialfluss, der mehrere Einsatzabschnitte durchläuft.

Moderne Produktionsanlagen sind komplexe und umfangreiche Systeme, die durch eine Virtuelle Inbetriebnahme schneller und mit höherer Qualität entwickelt werden können. Dafür werden zeitdeterministische Hardware-in-the-Loop-Simulationen benötigt, die an Stelle der realen Maschinen an die Steuerung angeschlossen werden. Der Materialfluss, als Gesamtbewegung von einzelnen Stückgütern innerhalb einer Produktionsanlage, ist ein besonders rechenintensives Element der Simulationsmodelle. Vor diesem Hintergrund wurde ein makroskopisches Flussmodells, basierend auf hyperbolischen partiellen Differentialgleichungen entwickelt, dessen Rechenzeit unabhängig von der Anzahl der simulierten Stückgüter ist. So soll die Simulation von materialflussreichen Anlagen ermöglicht werden.

**Erweiterte Validierung des Flussmodells**

Die Anwendung des Flussmodells ist bisher nur für spezielle Szenarien (gerades Förderband mit Abweiser und konstanter Geschwindigkeit) und einzelne Gütergeometrien validiert. Es ist unklar, ob das Modell auch für komplexere Szenarien und unterschiedliche Gütergeometrien bzw. -materialen gültig ist. In diesem Forschungsprojekt werden die Einsatzmöglichkeiten des makroskopischen Flussmodells erweitert, sodass verschiedene Stückgüter, Geometrien, sowie Zugabe und Entnahme von Gütern modelliert werden können. Auch ein dynamisches Layout soll ermöglicht werden. Das Flussmodell simuliert in zwei Ortsdimensionen, wobei die Einflüsse der örtlichen Umgebung miteinbezogen werden. Sowohl für die Erweiterung als auch für eine Parameterschätzung werden neue Realdaten mit mehr Variationen benötigt, wofür ein Realdemonstrator entwickelt und aufgebaut wird. Dieser soll genutzt werden, um Vergleichsdaten mit unterschiedlichen Szenarien aufzuzeichnen. Die Ausrichtung des Flussmodells auf komplexere Materialflusssysteme und die Modellierung mit speziell auf den Anwendungsfall optimalen Parametern soll den Einsatz des Flussmodells in der Virtuellen Inbetriebnahme materialflussreicher Anlagen in der Industrie ermöglichen.





**Kopplung zum Multi-Skalen-Netzwerkmodell**

Die Stärke des makroskopischen Flussmodells liegt in der Abbildung materialflussintensiver Anlagen. Dagegen können spezifische Stückgüter in dem Flussmodell nicht abgebildet werden. Um beide Anwendungsfälle in einer Simulation zu vereinen, soll das Flussmodell mit einem physikbasierten Modell kombiniert werden, sodass in einem Multi-Skalen-Netzwerk-Modell zwischen den Modellarten umgeschaltet werden kann. Bei der Simulation einer Anlage soll es möglich sein festzulegen, manches physikbasiert (Physikmodell) und anderes basierend auf dem Flussmodell zu simulieren. Es werden Umschaltbedingungen definiert, bei denen automatisiert zwischen den Modellen gewechselt wird. Darüber hinaus ist eine manuelle Anpassung der Bereiche möglich. Dabei kann sowohl räumlich als auch zeitlich umgeschaltet werden. Um beide Modelle in eine Simulation zu integrieren, ist eine effiziente Umrechnung zwischen den aktuellen Zuständen in beiden Modellen notwendig.

**Konvertierung der Modelle**

Für die Modellerstellung wird eine gemeinsame Ausgangsmodellierung entwickelt, sodass die Szenarien in beiden Modellen generiert werden können. Ziel ist es, ein Szenario einmal zu modellieren und daraus die Darstellung für beide Modellarten zu generieren. Die Modellierung wird zusätzlich durch die Entwicklung einer Bibliothek vereinfacht.

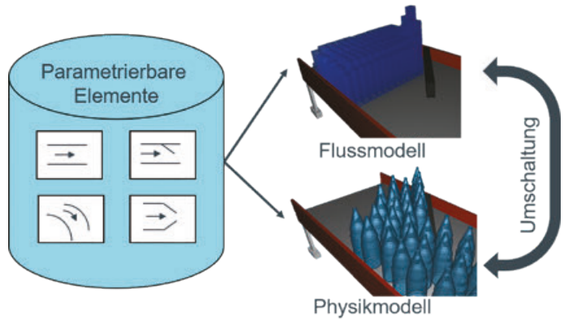



ABB.2: Umschaltung zwischen Flussmodell und Physikmodell mit Modellgenerierung aus einer Bibliothek.

**Projektpartner:** Universität Mannheim

**Kontakt:**
Annika Kienzlen, M.Sc.
annika.kienzlen@isw.uni-stuttgart.de

# STEUERUNGSINTEGRIERTER DIGITALER ZWILLING ZUR ONLINE-OPTIMIERUNG VON UMFORMPROZESSEN (SISI)

**GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)**

**In diesem Forschungsprojekt wird untersucht wie digitale Zwillinge für die Umformtechnik Realität werden. Dafür werden Methoden im Bereich der Echtzeitsimulation erforscht und Modelle für die Abbildung des Umformprozesses entwickelt. Die Kombination dieser beiden Elemente, die von den Partnerinstituten betrachtet werden, soll zu einem Gesamtkonzept zusammengeführt werden und experimentell untersucht werden. Das Ziel dieses Forschungsprojektes ist, die Steuerungsparameter in der Betriebsphase mit Hilfe des digitalen Zwillings so zu optimieren, dass Ausschuss reduziert wird und die Qualität erhöht werden kann.**

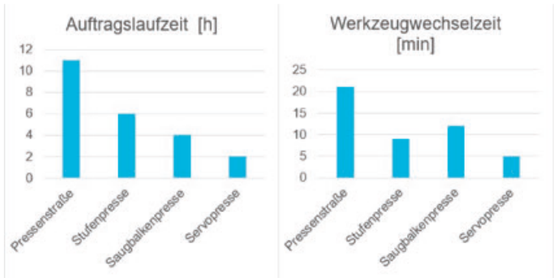



ABB.1: Leistungskennzahlen nach Pressentypen (Quelle: Hummelsberger et al.).

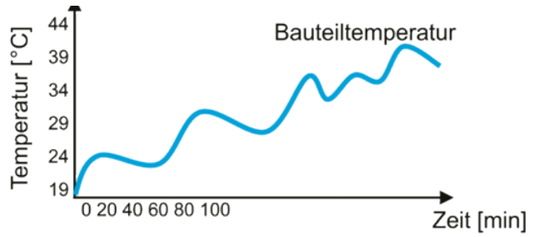



ABB.2: Verlauf der Bauteiltemperatur über der Produktionsdauer bei der Herstellung einer Fahrzeugkarosserie (Quelle: Dietrich et al.).

Bei der Herstellung von Blechformteilen steigt durch zunehmende Individualisierung die Variantenvielfalt. Somit werden die Losgrößen kleiner und Werkzeugwechsel häufiger (**ABB.1**). Dies hat eine Erhöhung des Ausschusses, bspw. durch die Erwärmung des Werkzeuges und Bauteils (**ABB. 2**), zur Folge. Des Weiteren sind durch dynamische Effekte, Schwankungen der Werkstoffeigenschaften, Regelabweichungen und verschleißbedingte Änderungen erfahrungsbasierte Vorhersagen der Fertigungsparameter während des Produktionsanlaufs nahezu unmöglich. Durch Simulationsmodelle kann das Umformergebnis mit einer hohen Wahrscheinlichkeit vorhergesagt werden. Aktuell fehlen allerdings Methoden, um eine umfassende Systemsimulation einer Umformpresse zu erstellen und diese während des Betriebs einzusetzen.

**Ziel eines steuerungsintegrierten digitalen Zwillings:**

Durch eine betriebsbegleitende Systemsimulation soll ein simulationsbasierter Eingriff auf die Steuerungsalgorithmen umgesetzt werden (**ABB. 3**). Dafür wird eine echtzeitfähige steuerungsintegrierte Simulationsumgebung für den digitalen Zwilling einer Umformpresse geschaffen. Aus der Systemsimulation der Umformpresse soll außerdem eine echtzeitfähige Modellbibliothek für die Umformtechnik entstehen.

**Lösungsansatz und Zielsetzung:**

Der digitale Zwilling eines Produktionssystems bildet dieses digital ab und zeichnet sich durch eine bidirektionale Anbindung an das reale Pendant aus, was unter anderem eine Online-Optimierung ermöglichen soll. Auf dem Weg zur Realisierung eines digitalen Zwillings wird eine Echtzeit-Co-Simulationsarchitektur für Steuerungssysteme entwickelt. Diese Architektur soll die Durchführung einer betriebsbegleitenden Systemsimulation aus Maschine und Prozess ermöglichen. Auf dieser Basis können Methoden für simulationsbasierte Steuerungsfunktionen entworfen werden.

Für den Umformprozess bemisst sich der Erfolg durch eine signifikante Verkürzung des Produktionsanlaufs nach dem Werkzeugwechsel und einer Echtzeitreaktion des Systems auf Umgebungsbedingungen, was zur Vermeidung von Produktionsfehlern führt.

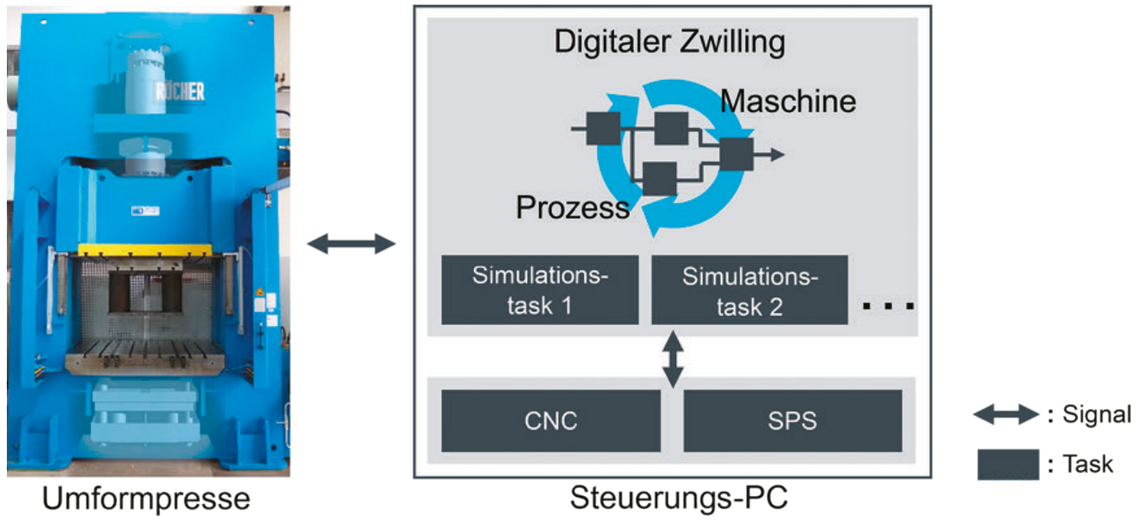



ABB.3: Übersicht des steuerungsintegrierten digitalen Zwillings für die Umformtechnik (Bildquelle links: TU Dresden).

**Kontakt:**
Lars Klingel, M.Sc.
lars.klingel@isw.uni-stuttgart.de

**Projektpartner:**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Foto: Ludmilla Parsyak, ISW Uni Stuttgart

FISW

**Steuerungstechnik GmbH**
**www.fisw.de**

ÜBER DIE GRENZEN DES MÖGLICHEN

Mit unserem Leistungsangebot zur „Steuerungs- und Antriebstechnik" unterstützen wir Sie bei der Verfolgung der wesentlichen Produktionsziele im Bereich Automatisierungstechnik. Zur Bewältigung Ihrer Herausforderungen bieten wir Ihnen folgende Leistungen:

- Consulting
- Konzeption
- Prototypen
- Produktentwicklung
- Optimierung
- Schulungskonzepte

In den Bereichen:

- Automatisierungssysteme und Sondermaschinen
- Steuerungs- und Regelungstechnik
- (Echtzeit-) Kommunikation
- Antriebs- und Maschinentechnik
- (Echtzeit-) Simulation
- Software- und Engineeringsysteme
- Informations- und Datenmodelle

**Dr.-Ing. Armin Lechler**

FISW Steuerungstechnik GmbH
Kriegsbergstraße 34
70174 Stuttgart

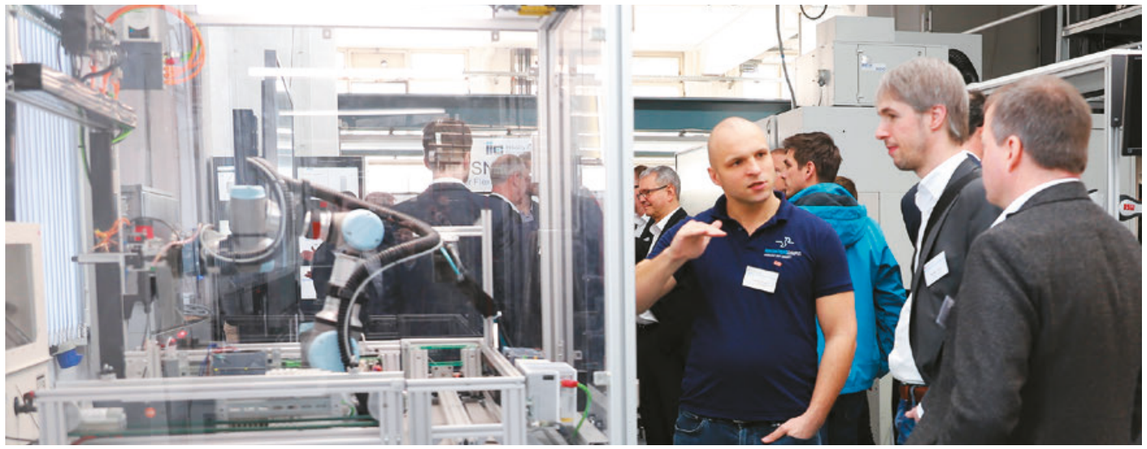
armin.lechler@fisw.de

Wir freuen uns darauf, zukünftige Herausforderungen zusammen mit Ihnen zu meistern.
Nehmen Sie Kontakt mit uns auf!

# INNOVATIONSCAMPUS MOBILITÄT DER ZUKUNFT (ICM)

GEFÖRDERT VOM MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST BADEN-WÜRTTEMBERG

**Die Mobilität und die Produktion der Zukunft sind nachhaltig, effizient und kommen aus Baden-Württemberg. Voraussetzung hierfür sind neue bahnbrechende Technologien – von innovativen Fahrzeugantrieben bis zu wandlungsfähigen Produktionsverfahren.**



Das Ziel des InnovationsCampus Mobilität der Zukunft (ICM) ist, diesen Wandel zu gestalten. Im ICM bündeln die Universität Stuttgart und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ihre Kompetenzen in Forschung und Innovation, um gemeinsam schnell und flexibel neue Technologien zu entwickeln, neue Ansätze zu erproben und die Basis für Sprunginnovationen zu schaffen.
Der Schwerpunkt des ICM liegt auf der disziplinenübergreifenden anwendungsorientierten Grundlagenforschung in drei Forschungsfeldern:

- Manufacturing Systems
- Mobility Technologies
- Software-System-Architectures

Der ICM ist eine der größten Forschungsinitiativen zur Mobilität und Produktion der Zukunft weltweit und wird seit dem 01.07.2019 durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg gefördert.
Das ISW erforscht innerhalb mehrerer Projekte mit unterschiedlichen Partnern verschiedenste Ansätze zur Optimierung der zukünftigen Produktion. Darunter erforschen wir unter anderem den Aufbau einer universellen und selbstlernenden Lasermaschine, den 3D-Druck optischer Elemente in Kooperation mit dem 4. Physikalischen Institut der Universität Stuttgart, neue modellgetriebene Entwicklungsmethoden für digitale Zwillinge und die digitale Transformation mittels OPC UA, sowie die Anwendung des maschinellen Lernens im Maschinenbau im Rahmen der Nachwuchsgruppe Grey-Box-Modellierung.
Der ICM bietet dem ISW eine Plattform interdisziplinäre Aufgabenstellungen und Forschungsfragen mit führenden Partnern aus Industrie und Forschung anzugehen.

**Kontakt:**
Jun.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Andreas Wortmann
andreas.wortmann@isw.uni-stuttgart.de





# FLEXIBLES SDM DURCH KONTINUIERLICHE SELBSTLERNENDE QUALITÄTSBEWUSSTE DIGITALE ZWILLINGE (SDM$^{flex}$)

GEFÖRDERT VOM MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST BADEN-WÜRTTEMBERG (MWK) IM RAHMEN DES INNOVATIONS-CAMPUS „MOBILITÄT DER ZUKUNFT“ (ICM)

**Hoch-adaptive, wandlungsfähige Produktionssysteme benötigen eine selbstständige und genaue Erfassung quantitativer Fähigkeitsindikatoren. Die Qualität der Prozessausführung und damit der Produkte und Maschinenfähigkeiten werden bislang nur unter festgelegten Prozess- und Rahmenbedingungen erfasst, sodass Qualitätsvorhersagen nur auf Basis von idealisierten Prozessen vorgenommen werden. Da sich das Maschinen- und Prozessverhalten im Betrieb ständig verändert, kommt es zu Diskrepanzen zwischen idealisierten Prozessqualitätsvorhersagen und realem Prozessverhalten. Hier setzt SDM$^{flex}$ durch die Entwicklung selbstadaptiver digitaler Zwillinge von Produktionssystemen mit prozessabhängigen, präzisen Qualitätsvorhersagen durch selbstständig erlernte Fähigkeiten und Qualitäten an.**

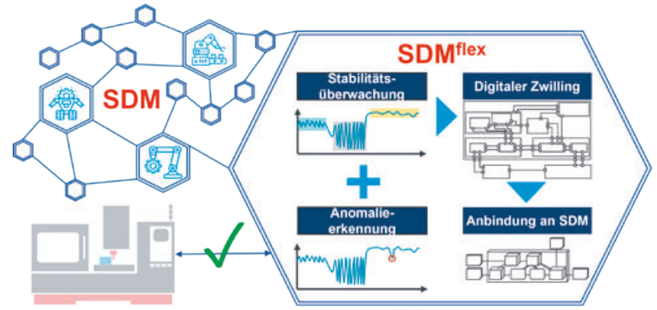



ABB.1: Konzept eines selbstadaptiven qualitätsbewussten digitalen Zwillingen von Produktionssystemen.

Im Software-Defined Manufacturing (SDM) kapseln digitale Zwillinge von Produktionssystemen deren Funktionen, Daten und Modelle, um eine hohe flexible Adaptivität zu erreichen. Für die Bestimmung der Qualität von Produktionssystemen existieren maschinen- und prozessspezifische Fähigkeitsindikatoren, welche anhand von Messungen des Maschinen- und Prozessverhaltens Rückschlüsse auf die zu erwartende Qualität der Produkte zulassen. Die Zusammenhänge zwischen Maschine, Prozess, Bauteilen und Umgebungsbedingungen sind selten exakt quantitativ bekannt, so dass diese von Experten mühsam zeit- und kostenintensiv erhoben und für die Produktionsplanung zugänglich gemacht werden müssen.
Ziel von SDM$^{flex}$ ist die selbstständige, präzise Bestimmung quantitativer Fähigkeitsindikatoren von Produktionssystemen und die modellgetriebene Integration dieser Verfahren in einen selbstadaptiven digitalen Zwilling. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Erfassung und Bereitstellung von Fähigkeitsqualitäten und ist das Fundament einer höheren Wandlungsfähigkeit im SDM. Hierzu werden zwei neuartige Methodiken zur selbst-identifikation von Fähigkeitsindikatoren entwickelt. Das erste Verfahren dient der Feststellung und Verbesserung von Produkt- und Prozessqualitäten, das zweite Verfahren dient der Erkennung und Minimierung von Verschleißfaktoren. Diese Verfahren werden in eine abgewandelte selbstadaptive Referenzarchitektur digitaler Zwillinge integriert. Hierdurch werden prozessabhängige, präzise Qualitätsvorhersagen getroffen und Optimierungsvorschläge erstellt. Durch eine plattformunabhängige Schnittstelle zu SDM werden die Ergebnisse von SDM$^{flex}$ bereitgestellt.

**Kontakt:**
Ann-Kathrin Splettstößer, M.Sc
ann-kathrin.splettstoesser@isw.uni-stuttgart.de

# NACHWUCHSGRUPPE ADVANCED MANUFACTURING: ENTWICKLUNG VON SCHLÜSSELTECHNOLOGIEN FÜR EINE UNIVERSELLE LASERMASCHINE (NWG AM)

**GEFÖRDERT VOM MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST BADEN-WÜRTTEMBERG (MWK) IM RAHMEN DES INNOVATIONS-CAMPUS „MOBILITÄT DER ZUKUNFT“ (ICM)**

**Ziel der Nachwuchsforschergruppe ist die Erforschung und Entwicklung der Schlüsseltechnologien für eine Universalmaschine im Sinne einer vollständig digitalisierten Produktion mit vollumfänglich flexibel einsetzbarer Fertigungstechnik. Die zentralen Elemente sind hierbei eine flexible Systemtechnik und eine universelle Steuerungsarchitektur, welche individuelle Steuerungsapplikationen je nach Einsatzzweck nahtlos ausführen kann. Zudem soll der Prozess über die Systemdiagnose permanent überwacht werden und alle Daten für eine kontinuierliche eigenständige Optimierung und Adaption genutzt werden.**

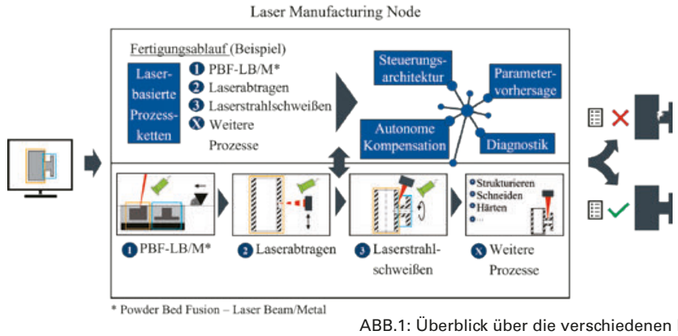



ABB.1: Überblick über die verschiedenen Komponenten einer universellen Lasermaschine. © IFSW, Universität Stuttgart.

Am ISW soll die Steuerungstechnik der Universalmaschine entwickelt werden, welche einen Betrieb in unterschiedlichsten Konfigurationen ermöglicht. Zudem soll der Austausch einzelner Steuerungsteile ermöglicht werden, ohne dass die gesamte Maschine angehalten werden muss. Hierfür soll eine flexible modulare Steuerungsarchitektur auf Basis Cyber-physischen Produktionssystemen erstellt werden. Damit soll eine auf den aktuellen Einsatzzweck abgestimmte Kombination von Steuerungsapplikationen ausgeführt werden. Die Echtzeitkommunikation soll dabei durchgehend zur Verfügung stehen und Anpassungen an der Netzwerkkonfiguration so ausgeführt werden, dass das Echtzeitnetzwerk zu jedem Zeitpunkt funktionsfähig ist. Dadurch sollen Einschränkungen beim Wechsel von Steuerungsapplikationen verringert werden.
Um die Funktionsfähigkeit des Echtzeitnetzwerkes zu jedem Zeitpunkt sicherzustellen, soll das Zeitverhalten von verteilten Echtzeitapplikationen und Echtzeitnetzwerden zunächst Analysiert werden, um aus den daraus ermittelten Anforderungen Potentiale für eine unterbrechungsfreie Rekonfiguration des Netzwerkes abzuleiten.
Die sich daraus ergebenden Möglichkeiten zur gezielten Anpassung des Zeitverhaltens der bestehenden Echtzeitdaten sollen im Anschluss gezielt eingesetzt werden, um das bestehende Echtzeitnetzwerk so anzupassen, dass die Daten neu hinzukommender Echtzeitapplikationen ebenfalls versendet werden können. Zur Umsetzung soll ein PC-basiertes Testsystem auf Basis von Linux mit Preempt RT Patch genutzt werden. Zudem soll auf den in Time Sensitive Networking (TSN) spezifizierten Erweiterungen des Ethernet-Standards aufgebaut werden.

**Kontakt:**
Christian von Arnim, M.Sc.
christian.von-arnim@isw.uni-stuttgart.de



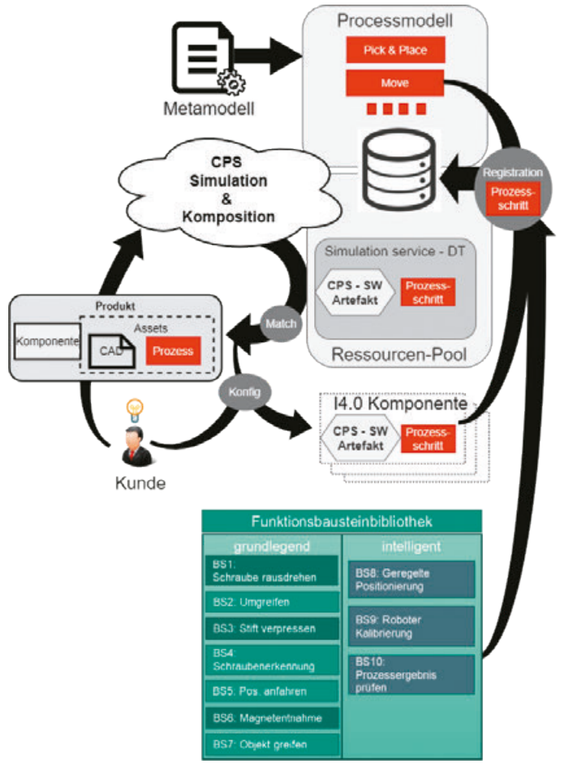


# SOFTWARE-DEFINED MODEL AND FUNCTION SEQUENCING FOR INTEGRATED LAUNCHING OF MODULAR PRODUCTION SYSTEMS (SDSeq)

**GEFÖRDERT VOM MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST BADEN-WÜRTTEMBERG (MWK) IM RAHMEN DES INNOVATIONSCAMPUS „MOBILITÄT DER ZUKUNFT“ (ICM)**

**Die Automatisierung der Erstellung von Steuerungssystemen ist in der Industrie von großer Bedeutung. Eine Möglichkeit, die Effizienz und Zuverlässigkeit bei der Entwicklung von Steuerungssystemen zu verbessern, ist diese vollständig automatisiert von Code aus Funktionsbausteinen zu generieren. Das Ziel dieses Projekts ist es, eine Plattform zu entwickeln, die es ermöglicht, spezifische Code-Generatoren zu registrieren und zu aggregieren, um RT-Steuerungscode aus vordefinierten Funktionsbausteinen zu generieren.**

Die Entwicklung der Code-Generatoren stellt hierbei eine zentrale Herausforderung dar. Typische Anforderungen an deterministische Echtzeitanwendungen müssen berücksichtigt werden, um die Zuverlässigkeit der Steuerungssysteme zu gewährleisten. Eine solche Entwicklung setzt eine modellbasierte Entwicklung von Funktionsbausteinen sowie eine nachgelagerte Validierung unter Verwendung von digitalen Zwillingen voraus. Die Plattform umfasst hierfür einen zentralen Prozess, der die Code-Generatoren kapselt und semantische Informationen von einzelnen Funktionsbausteinen aggregiert. Der generierte Code wird über eine nachgelagerte Simulation validiert, um die Zuverlässigkeit der generierten Steuerungssysteme zu gewährleisten. Das schlussendliche Ziel ist, den RT-Steuerungscode einer gesamten Anlage automatisiert aus dem Prozessmodell zu generieren.
Die Automatisierung der Code-Generierung hat das Potenzial, die Entwicklung von Steuerungssystemen zu beschleunigen und menschliche Fehler zu reduzieren. Es wird angestrebt, dass eine solche Plattform den Anwender befähigt, effektiver auf Herausforderungen in der Industrie zu reagieren und ihre Effizienz zu verbessern.
Zudem forscht das ISW hierbei die Softwarekomponente im Kontext des Cloud Manufacturing ebenfalls als Teil des Produktes einer Fertigung mit zu betrachten, dessen Anforderungen modellbasiert abzubilden und vollständig automatisiert zu generieren.




**Kontakt:**
Matthias Milan Strljic, M.Sc.
matthias.strljic@isw.uni-stuttgart.de

# INFRASTRUKTUR FÜR EINE DURCHGÄNGIGE DIGITALISIERUNG DER PRODUKTION AUF BASIS VON GAIA-X (GAIA-X4ICM)

**GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK) IM RAHMEN DES INNOVATIONSCAMPUS „MOBILITÄT DER ZUKUNFT“ (ICM)**

**Das europäische Forschungsvorhaben Gaia-X schafft die Basis für eine sichere und vernetzte Dateninfrastruktur und gilt als Schüsseltechnologie für die digitale Souveränität in Europa. Im Rahmen des Projektes GAIA-X4ICM sollen die bisherigen Gaia-X Spezifikationen nutzbar gemacht, in eine konkrete Instanz überführt und Anwendungsfälle aus der Produktionstechnik beispielhaft umgesetzt werden.**

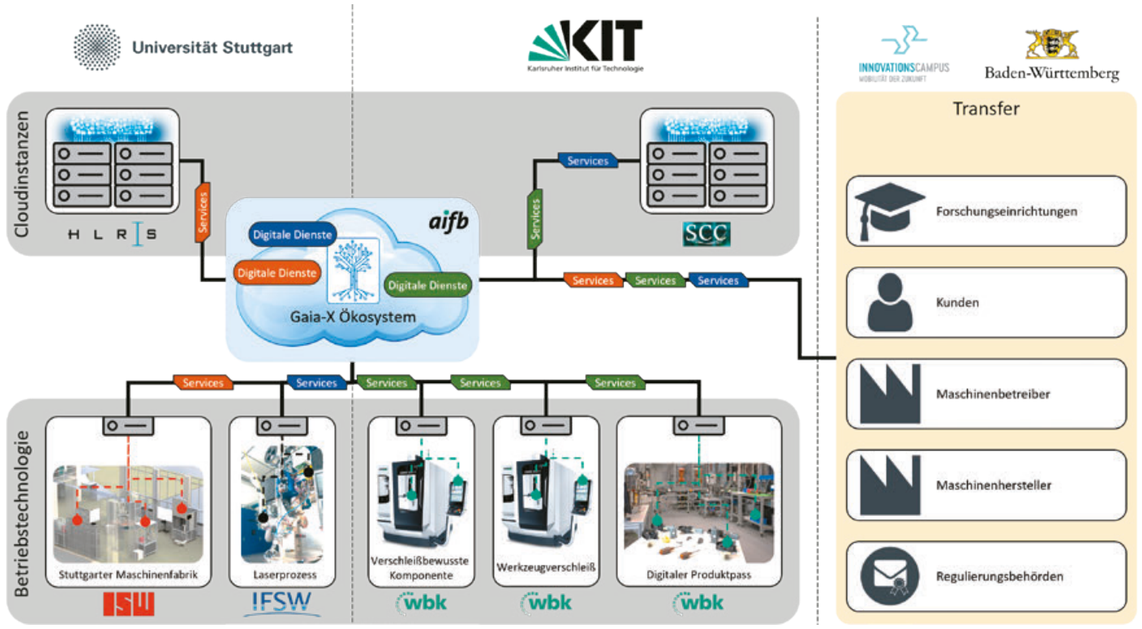



ABB.1: GAIA-X4ICM Gesamtarchitektur.

Die Digitalisierung der Produktion ist ein branchenweites strategisches Ziel und wichtigster Treiber für Innovationen. Zwischen Ideen, Konzepten und Visionen auf der einen Seite und der industriellen Realität auf der anderen Seite gibt es jedoch nach wie vor eine signifikante Lücke. Dies ist vor allem bei rein datenbasierten Methoden und Lösungen, die auf stark skalierbare Plattformen bauen, der Fall. Darüber hinaus endet die Digitalisierung der Produktion häufig auf der Fabrikebene, unternehmensübergreifende Ansätze sind kaum präsent. Im IT-Umfeld wurden diese Hürden durch Ansätze wie Edge- und Cloud-Computing sowie einheitliche Standards und Datenmodelle bewältigt, welche sich jedoch nur schwer auf die Produktionstechnik übertragen lassen. Die Kompatibilität der Architekturen und Methoden ist limitiert, die Konnektivität ist komplex, einheitliche Datenmodelle fehlen und es gibt weitreichende Probleme hinsichtlich der Kontrolle über die Systeme sowie der Sicherheit der Daten. Das europäische Projekt Gaia-X soll ein Ökosystem schaffen, welches die genannten Defizite behebt. Die gemeinsam von Wirtschaft und Forschung getriebene Initiative setzt dabei





auf offene Standard-IT-Lösungen, erweitert diese und nutzt sowohl zentrale Cloud- als auch verteilte Edge-Ansätze. Obwohl bereits ein großer Fortschritt im Rahmen von Gaia-X zu verzeichnen ist, eine grundlegende Architektur vorliegt und erste Dienste geschaffen wurden, profitieren bisher Wissenschaft und Wirtschaft nur in geringem Umfang davon. Selbst die Erforschung und Weiterentwicklung der bisher erarbeiteten Architektur und Komponenten sind kritisch, da konkrete Umsetzungen und Erfahrungen fehlen und die Einstiegshürden in die Thematik sehr hoch sind.

Ziel des Projektes ist es, Gaia-X für die produzierende Industrie nutzbar zu machen. Die zur Erreichung des Ziels geplanten Arbeiten gliedern sich in drei Teilprojekte, welche sich an den Ebenen Basis-Infrastruktur, Gaia-X-Ökosystem sowie Applikation orientieren. Zur Schaffung der Basis-Infrastruktur werden sowohl die Hardware-Ressourcen als auch die notwendigen Softwarelösungen instanziiert. Das Gaia-X Ökosystem setzt auf der Infrastruktur auf und verteilt sich auf die Cloud- und Edge-Knoten. Neben Basisdiensten und Datenräumen stehen hier geeignete Prozesse im Fokus, welche unter anderem das sichere und systematische On-Boarding neuer Dienste und Teilnehmer ermöglichen. Auf der Applikationsebene werden verschiedene Anwendungen umgesetzt, welche innovative digitale Ansätze mit realen Produktionsszenarien koppeln. Die Umsetzung erfolgt an mehreren Standorten und schließt die Integration der Infrastruktur in Rechenzentren sowie die Kopplung mit realen Produktionssystemen in Forschungsfabriken mit ein.

Die Infrastruktur, die entwickelten Methoden sowie die Erfahrungen werden bereits früh in der Projektlaufzeit aktiv weiteren Akteuren aus Forschung und Industrie zur Verfügung gestellt. Dabei wird sowohl eine Nutzung in bestehenden Projekten als auch die Nutzung in neuen Aktivitäten angestrebt. Es ist geplant das entstehende Ökosystem auch über die Projektlaufzeit hinaus kontinuierlich zu vergrößern um Interessierten aus Forschung und Industrie einen unkomplizierten und einfachen Einstieg in die Welt von Gaia-X, souveränen Datenräumen und firmenübergreifenden digitalen Mehrwertdiensten zu ermöglichen.

**Projektpartner:**

IFSW · H L R S High-Performance Computing Center | Stuttgart · wbk · aifb · SCC

**Kontakt:**
Wolfgang Bubeck, M.Sc.
wolfgang.bubeck@isw.uni-stuttgart.de

## Lageregelseminar

Auf der zweitägigen Veranstaltung geben unsere Referenten aus Industrie und Forschung einen spannenden Überblick zu aktuellen Forschungsergebnissen und Entwicklungen aus der Robotik, Antriebs- und Maschinentechnik und der Additiven Fertigung. Hierfür werden praxisbezogene experimentelle Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

Weitere Informationen zur Veranstaltung finden Sie unter:

**www.lageregelseminar-stuttgart.de**

ORGANISATION ISW VERANSTALTER IFSW

# TECHNOLOGIEÜBERGREIFENDES MANAGEMENT UND ENGINEERING KONVERGENTER TSN-BASIERTER ECHTZEITKOMMUNIKATION AUF BASIS GEMISCHTER ETHERNET- UND WI-FI-NETZWERKE (MEKonTSN)

**GEFÖRDERT VOM MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST BADEN-WÜRTTEMBERG (MWK) IM RAHMEN DES INNOVATIONSCAMPUS „MOBILITÄT DER ZUKUNFT" (ICM)**

**Um den Anforderungen der Digitalisierung und Flexibilisierung gerecht zu werden, wird die industrielle Kommunikation zu konvergenten IT/OT Netzwerken transformiert. Neben Time-Sensitive Networking (TSN) gewinnt die Drahtlostechnologie Wireless TSN (WTSN) an Bedeutung. Für deren Nutzung in der Produktionstechnik, müssen die technologieübergreifende Nutzung deterministischer Funktionen, die Konfiguration, das Management und die Integration in Engineering-Prozesse gelöst werden. Ziel des gemeinsamen Vorhabens des ISW und Intel ist es, WTSN als Teil zukünftiger konvergenter Echtzeitnetzwerke für die Produktionstechnik effizient nutzbar zu machen.**

Wireless TSN (WTSN) stellt eine weniger komplexe und günstige Alternative zu mobilfunkbasierten Lösungen für die drahtlose industrielle Kommunikation dar. Jedoch wird WTSN nicht alle drahtgebundenen Kommunikationsstrecken in einer Produktion ersetzen können. Vielmehr wird eine für den jeweiligen Anwendungsfall maßgeschneiderte Kombination aus TSN, WTSN und 5G die benötigten Datenübertragungslösungen für konvergente IT/OT Netzwerke zur Verfügung stellen. Um diese technologieübergreifende Kommunikationsnetzwerke nutzen zu können bedarf es Lösungen zur Konfiguration, zum Management und zur Integration in Engineering-Prozesse sowie zur technologieübergreifenden Nutzung von deterministischen Funktionen. In diesem Punkt setzen das ISW und Intel mit diesem gemeinsamen Forschungsprojekt an.

Ziel des Forschungsprojekts MEKonTSN ist, drahtlose TSN-Netzwerke (WTSN – Wireless Time-Sensitive Networking) als Teil zukünftiger konvergenter Echtzeitnetzwerke für die Produktionstechnik effizient nutzbar zu machen. Gemischte drahtgebundene und drahtlose TSN-Netzwerk sollen aus industrieller Applikationssicht als einheitliches konvergentes Netzwerk abstrahiert werden. Technologiespezifische Aspekte dürfen keinen Einfluss auf die Applikationsentwicklung sowie das Engineering haben. Eine gemeinsame Abstraktion der Technologien muss die Anforderungen der Applikationen, beispielsweise die deterministische Kommunikation mit einem Sensor, transparent auf spezifische Lösungen mappen, unabhängig ob dieser drahtgebunden in einer stationären Maschine verbaut oder auf einem mobilen Roboter eingesetzt wird. Die Umsetzung verteilter Echtzeitanwendungen auf einer gemischten drahtgebundenen und drahtlosen Kommunikationsarchitektur wurde bisher wissenschaftlich kaum betrachtet und weißt daher eine große Relevanz auf.

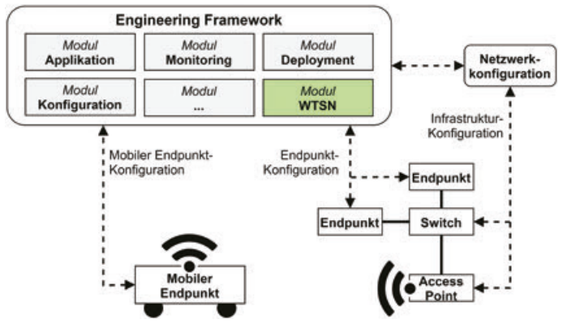



ABB.1: Systemübersicht der offenen Lösung.

Hierzu werden die technischen Ziele verfolgt, ein Systemverständnis zu schaffen, Methoden für das Netzwerk-Management und das Engineering zu erforschen und offene Lösungen für Endgeräte und das Engineering zu etablieren. Darüber hinaus sollen praktische Erkenntnisse in Form von Best-Practices und Referenzanwendungsfällen generiert werden. Zusätzlich soll der Transfer in Wirtschaft und Wissenschaft in Form eines offenen Ökosystems erfolgen sowie die Standardisierung aktiv vorangetrieben werden. Als wirtschaftliches Ziel soll durch die Etablierung einer günstigen und lokal betreibbaren Lösung, insbesondere als Alternative zu mobilfunknetzbasierten Ansätzen, drahtlose Echtzeitkommunikation auch für kleine und mittlere Unternehmen nutzbar werden. Gleichzeitig soll durch die Offenheit standardbasierter Technologie und verfügbaren Lösungen ein Beitrag zur digitalen Souveränität geleistet werden

Zur Erreichung der Ziele verfolgt das Vorhaben einen offenen Lösungsansatz: Basis des Vorhabens bildet die Modellierung konvergenter Echtzeit-Kommunikation, der WTSN-Technologie und mobiler Anwendungen. Hierbei sollen sowohl die Datenkommunikation als auch die deterministischen Funktionen abgebildet werden. Darauf aufbauend erfolgt die Entwicklung einer technologieübergreifenden Managementmethodik für konvergente TSN-WTSN-Netzwerke sowie Endpunkte. Die Methodik soll basierend auf Applikationsanforderungen, welche im entwickelten Modell repräsentiert werden, Lösungen für die Teilnetzwerke finden und diese nahtlos zu einer netzwerkweiten Lösung kombinieren. Hierzu sollen beispielweise unter Berücksichtigung der technologiespezifischen Garantien Schedules errechnet und die notwendigen Konfigurationen generiert werden. Die Ergebnisse sollen in Open-Source Endpunkt- und Engineering-Lösungen integriert und anschließend praktisch erprobt und validiert werden. Zur Validierung und Erprobung soll eine reale und umfassende Demonstratoranwendung umgesetzt werden, welche auf einem mobilen Endpunkt (FTF) basiert. Parallel soll ein kontinuierlicher Austausch mit Standardisierung (insbesondere IEEE), Industriegremien (insbesondere UWIN SIG) und Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft erfolgen.

Die komplementären Interessen der Partner ergänzen sich im Vorhaben optimal. Intel stellt dem ISW hierbei frühzeitig Hardware- und Softwarelösungen zur Verfügung, das ISW erforscht grundlegende Fragestellungen. Hierbei wird ein Beitrag zu den strategischen Zielen des ICM – eine hochflexible, autonome und software-definierte Produktion – geleistet. Die effiziente Nutzbarkeit konvergenter Echtzeitnetzwerke eröffnet ein großes Innovationspotential für drahtlose und mobile Komponenten und Anwendungen wie autonome Roboter, flexible Rekonfiguration und Sensorintegration. Ein besonderes Interesse an den Projektergebnissen wird dabei von KMU erwartet, welche drahtlose Echtzeitkommunikation nutzen möchten, ohne in komplexe Mobilfunktechnologien zu investieren.

**Projektpartner:** intel

**Kontakt:**
Dipl.-Ing. Philipp Neher
philipp.neher@isw.uni-stuttgart.de

STUTTGARTER INNOVATIONSTAGE

**TRENDS UND INNOVATIONEN RUND UM DAS THEMA STEUERUNGSTECHNIK UND DIGITALISIERUNG**

Die hohe Skalierbarkeit und der Ressourcenreichtum von Cloud-Plattformen sollen auch für die Steuerungstechnik nutzbar gemacht werden. Dieser Gedanke war 2017 Grundlage der ersten Veranstaltung „Stuttgarter Innovationstage – Steuerungstechnik aus der Cloud". Inzwischen wird die Veranstaltung jährlich durchgeführt und informiert über die aktuellen Trends und Innovationen rund um das Thema Steuerungstechnik und Digitalisierung.

Weitere Informationen zur nächsten Veranstaltung finden Sie unter:

**www.stuttgarter-innovationstage.de**

ORGANISATION ISW VERANSTALTER FISW

## SOFTWARE-DEFINIERTE WERTSTROMPROZESSSYSTEME (SDW)

**GEFÖRDERT VOM MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST BADEN-WÜRTTEMBERG (MWK) IM RAHMEN DES INNOVATIONS-CAMPUS „MOBILITÄT DER ZUKUNFT“ (ICM)**

**Immer individuellere Produkte und schnellere Produktlebenszyklen erfordern eine immer höhere Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Produktion. Im Rahmen von Industrie 4.0 und Software-defined Manufacturing wird bereits stark an der Automatisierung und Anpassbarkeit der Software gearbeitet. Dem gegenüber stehen jedoch weiterhin stark spezialisierte Produktionsmaschinen. Ziel des Forschungsvorhabens ist daher, durch Wertstromprozesssysteme die Flexibilität der Hardware zu steigern.**

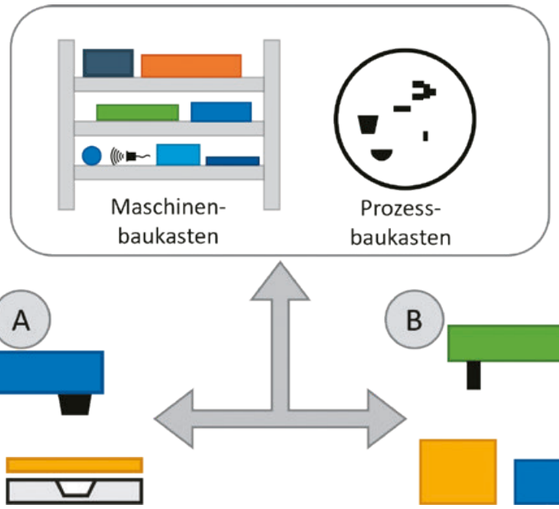



ABB.1: Maschinen aus Baukastenelementen für 1-Achs-Biegen (Variante A) oder 3-Achs-Fräsen (Variante B).

Die steigende Nachfrage nach individuell gestalteten Produkten und die zunehmende Volatilität der Märkte erfordern eine steigende Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der Produktion. Lösungsansätze bieten Industrie 4.0 und Software-defined Manufacturing. Sie ermöglichen mithilfe digitaler Schatten oder digitaler Zwillinge von Produktionsanlagen oder Prozessen eine virtuelle Planung und Optimierung.
Innovative Ansätze hierzu werden bereits im Projekt SDM4FZI untersucht und weiterentwickelt. Sie basieren jedoch auf einer fest definierten Hardware, die speziell für die Durchführung bestimmter Bearbeitungsprozesse entwickelt wurde. Dies beschränkt die Flexibilität auf Seiten der Hardware jedoch stark, da beispielsweise der Aufbau neuer Produktionslinien für neue Produkte oft die Anschaffung neuer Spezialmaschinen erfordert, während alte Maschinen nicht weiterverwendet oder aufwändig umgerüstet werden müssen.
Mithilfe von Wertstromprozesssystemen soll Hardware zukünftig durch Modularisierung eine genauso starke Flexibilität wie Software erreichen. Dabei sollen die Systeme nicht wie bisher meist aus vordefinierten roboterähnlichen Standardkinematiken bestehen, sondern die Möglichkeit bieten, Prozesse und Maschinen produktindividuell zu konfigurieren.
Das Kernstück bietet hierfür ein Baukastensystem, welches sich in Maschinenelemente (z.B. Linearachsen) und Prozesselemente (z.B. Endeffektoren) aufteilt (siehe ABB. 1). Neben der reinen Hardware stehen zu jedem Baukastenelement weitere Informationen zu Prozessen und Software zur Verfügung, die für die Planung und den Betrieb genutzt werden.

Neben der eigentlichen Hardware stehen für jedes Baukastenelement weitere Module zur Verfügung. Diese beinhalten digitale Schatten bzw. digitale Zwillinge der Hardwarekomponenten, sowie Softwarekomponenten. Welchen Detaillierungsgrad beispielsweise die digitalen Zwillinge besitzen müssen, oder ob es mehrere digitalen Zwillinge in unterschiedlichen Ausbaustufen benötigt, ist Teil des aktuellen Forschungsinhalts.
Eine digitale Prozesskette ermöglicht vorab eine Planung und Optimierung der Zusammenstellung der Baukastenelemente, welche anschließend in der realen Produktion aufgebaut werden. Geht nach Auftragsende eine neue Produktanfrage ein, beginnt diese Planung und Optimierung erneut. Die bestehenden Baukastenmodule werden unter Berücksichtigung der neuen Anforderungen, sowie weiteren Randbedingungen mithilfe eines zu definierenden Kostenfunktionals neu miteinander kombiniert. Somit wird bestehende Hardware wiederverwendet, wodurch eine Investition in neue, teure Anlagen entfällt. Eine optimierte Planung des Baukastens und dessen Elemente reduziert gleichzeitig das Lager der nicht verwendeten Module auf ein Minimum.

Das vorrangige Ziel ist somit zunächst, mithilfe modularisierter Beispielmaschinen die wesentlichen Herausforderungen und Anforderungen zu identifizieren, die zur erfolgreichen Umsetzung wandelbarer Hard- und Software adressiert werden müssen und diese im nächsten Schritt anzugehen.
Die äußerst vielfältigen Herausforderungen eines solchen Vorhabens bedingen die interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener Forschungsgruppen, weshalb für dieses Projekt mit mehreren Instituten der Universität Stuttgart sowie des Karlsruher Instituts für Technologie zusammengearbeitet wird.

**Kontakt:**
Alexander Schulte M.Sc.
alexander.schulte@isw.uni-stuttgart.de

# ROBOTERGESTÜTZTE MANIPULATION BIEGESCHLAFFER BAUTEILE MIT HOHER VARIANZ UND PROZESSUNSICHERHEITEN IN DER PRODUKTION VON ELEKTROFAHRZEUGEN (RoboCable)

**GEFÖRDERT VOM MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST BADEN-WÜRTTEMBERG (MWK) IM RAHMEN DES INNOVATIONS-CAMPUS „MOBILITÄT DER ZUKUNFT“ (ICM)**

**Kabelbäumen kommt in der Produktion von Elektrofahrzeugen eine besondere Bedeutung zu. Sie sind aber mangels robuster Prozesse und Modelle nicht automatisiert handhabbar. Prozesse zur Kabelbaummanipulation sowie deren notwendigen Modelle weisen hohe Unsicherheiten auf, die durch das biegeschlaffe Verhalten der Kabelbäume, sowie durch Unsicherheiten in der Auswertung der Sensorik hervorgerufen werden. Daher erforscht dieses Forschungsprojekt die Nutzung neuartiger KI-Methoden für Roboter mit Kraft- und Bildsensorik zur robusten Manipulation von biegeschlaffen Bauteilen.**

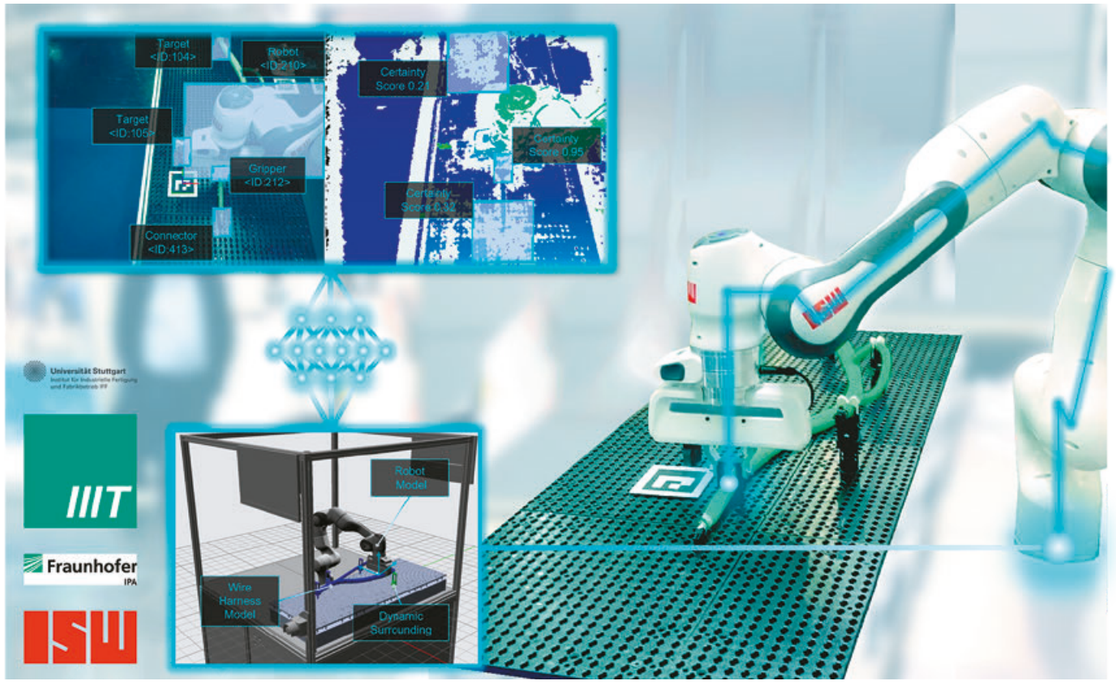



ABB.1: Konzept zur Nutzung von RGBD-Bilddaten und Simulation zur robotergestützen Manipulation von biegeschlaffen Bauteilen.

Gesteigerte Funktionalität moderner Bordnetze in Elektrofahrzeugen erhöhen konsequent die Komplexität der Kabelbäume. Bei 60 kg Gewicht und einer Gesamtlänge von mehreren Kilometern ist der Kabelbaum einer der kostenintensivsten Komponenten in Fahrzeugen. Dabei sind Fehler bei einer falschen Handhabung des Kabelbaums teuer, die Arbeit mit dem Kabelbaum körperlich hoch anstrengend sowie die Fachkräfte für die manuelle Arbeit knapp.
Deshalb wird der Einsatz von Robotern zur Handhabung untersucht. Zentrale Herausforderung ist dabei die Unsicherheiten in den Prozessen, sowie die Schwierigkeit in der Modellbildung von Kabelbäumen. Um diese zu identifizieren und zu kompensieren, sollen Datensätze zur gezielten Manipulation aufgenommen werden, um anschließend KI-Methoden darauf anzuwenden.
Dabei teilt sich das Projekt auf in der Entwicklung einer robusten Positionsschätzung mittels einer Lichtfeldkamera (durch das IIIT), einer modellbasierten Korrespondenzschätzung zwischen Sensordaten und unterliegendem digitalen Bauteilmodell (ISW), einer Parametrierung einer Skill-Abfolge zur Manipulation (IFT) sowie einer über Prozessmodule realisierten Robotersteuerung (IPA).
Ziel des Forschungsprojekts ist die Montage eines Kabelbaums anhand eines realen, industriellen Testszenarios, aufgebaut als Demonstrator, dargestellt in **ABB. 1.**

**Zielsetzung des ISW:**
Das Ziel ist die Reduzierung der Unsicherheiten in der Erfassung und Modellierung biegeschlaffer Bauteile durch die Kombination von Sensordaten, Modellwissen und Erfahrungen in Form von Trainingsdaten. Eindeutige Zustände von digitalen biegeschlaffen Modellen mit hochdimensionalen Sensordaten, z.B. Pixeldaten oder Punktwolken, in Korrespondenz zu setzten und robust auszuwerten, ist hierbei die zentrale Herausforderung.

**Lösungsansatz:**
Der unendlich dimensionale Konfigurationsraum des biegeschlaffen Bauteils wird durch ein niedrigdimensionales und daher recheneffizientes Finite-Segmente-Modell modelliert. Anhand des Modells und realer Sensordaten wird eine Datenbasis aus synthetisch generierten und realen Messdaten erstellt, welche einerseits offline Daten zum Training neuronaler Netze, als und auch online Daten zur Validierung der Performance enthält. Anhand der Datenbasis werden geeignete ML-Verfahren zur Korrespondenzschätzung mit den offline Daten trainiert und anhand der online Daten evaluiert. Modellbildung und Parametrierung finden dabei mit realen Messdaten statt. Dabei soll das später im Demonstrator verwendete Bauteil genutzt werden, anhand dessen reale Daten aufgenommen, sowie synthetische Daten aus dem Modell generiert werden.

**Zwischenergebnisse:**
Zur Korrespondenzschätzung ist es zuerst notwendig, physikalische Merkmale eines Kabelbaums aus Bildsensordaten zu extrahieren, siehe **ABB. 2.**
Dazu wurde ein Deep-Learning Netzwerk trainiert, welches die Stecker und Clips, sowie Verzweigungs- und Überlappungspunkte schätzen kann. In einem nächsten Schritt sollen dann die extrahierten Features mit den Bauteilinformationen verglichen werden, wodurch die Korrespondenzschätzung gelöst werden soll.

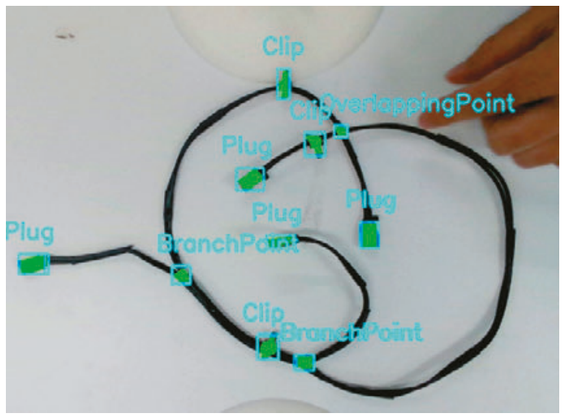



ABB.2: KI-basierte Erkennung von Merkmalen auf einem vereinfachten Demokabelbaum.

**Projektpartner:**

Universität Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF

IIIT

Fraunhofer IPA

**Kontakt:**
Manuel Zürn, M.Sc.
manuel.zuern@isw.uni-stuttgart.de

## SELF LEARNING FUNCTIONAL LASER MICROMACHINING (SELF)

**GEFÖRDERT VOM MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST BADEN-WÜRTTEMBERG (MWK) IM RAHMEN DES INNOVATIONS-CAMPUS „MOBILITÄT DER ZUKUNFT“ (ICM)**

**Ultrakurz gepulste Laser stellen universelle Werkzeuge dar, mit denen hochpräzise Fertigungsverfahren für unterschiedlichste Materialien realisiert werden können. Eine große Herausforderung ist die optimale Einstellung von Laser und Maschine auf jede neue Bauteilgeometrie und jedes neue Material, insbesondere bei kleinen Losgrößen. Das Ziel des Projekts ist die Umsetzung einer selbstlernenden Laserwerkzeugmaschine, welche die Auslegung und Optimierung der effizientesten und ökonomischsten Laserparameter lernt und die geforderte Bauteilgeometrie automatisiert fertigt. Durch die lernende Laserwerkzeugmaschine sollen Anwendungen mit hohen Anforderungen mit geringer Inbetriebnahmezeit umgesetzt werden können, beispielsweise in der Medizintechnik, Mikroelektronik, Feinmechanik oder Photonik.**

ABB.1: Schematische Darstellung der Gesamtarchitektur.

Das Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer lernenden Laserwerkzeugmaschine, die ihre Prozesse kontinuierlich optimiert. Im Speziellen soll im Rahmen des Projekts eine definierte Abtragtiefe unter Einhaltung einer vorgegebenen Oberflächenrauheit bei möglichst hoher Produktivität für verschiedenste Materialien erzielt werden. Hierzu wird ein optisches Messsystem auf Basis der optischen Kohärenztomographie (OCT) in die Maschine integriert. Das OCT ist in der Lage, geometrische Merkmale (Abtragtiefe und Oberflächenrauheit) zwischen einzelnen Bearbeitungsschritten zuverlässig und hochaufgelöst zu erfassen.
Die gesammelten Daten des Inline-Messsystems werden mit den eingestellten Steuerungsparametern sowie gegebenen und nicht beeinflussbaren Parametern, wie beispielsweise der Wellenlänge des Lasers, fusioniert. Mithilfe von Machine Learning Methoden können daraufhin Prozessparameter und zu erwartende Prozessergebnisse präzise vorhergesagt werden. Auf diese Weise kann die Lasermaschine ihre Prozesse kontinuierlich verbessern und die Bauteilgeometrie entsprechend der Vorgaben hochgenau fertigen, auch bei unbekannten Materialien.
Die Umsetzung des Projekts erfolgt anhand von industriellen Anwendungsfällen des Industriepartners LightPulse, um die Leistungsfähigkeit der lernenden Lasermaschine unter industriellen Bedingungen zu demonstrieren. Eine erfolgreiche Implementierung soll dazu beitragen, die Effizienz und Wettbewerbsfähigkeit der betreffenden Unternehmen erheblich zu verbessern.
In der ersten Projektphase wurde eine offene und flexible Gesamtarchitektur (siehe **ABB. 1**) zur Datenerfassung und -verarbeitung (Stage 1) entwickelt. Dabei werden die eingestellten Steuerungsparameter mit Messdaten fusioniert, aufbereitet und in einer Zeitreihendatenbank abgespeichert. Die automatisierte Datenerfassung und Prozessteuerung wird auf Basis der KAmeL Software des IFSW umgesetzt. Die Datenaufbereitung, Fusionierung sowie die Integration der Machine Learning Algorithmen erfolgt in der eventbasierten Datenverarbeitungsplattform Collectu des ISW.
Bei noch unbekannten Werkstoffen lassen sich mit diesem Gesamtsystem effiziente sequenzielle Versuchsplanungen und folglich vollständig automatisierte Parameteroptimierungen durchführen. Durch die integrierte Bayes'sche Optimierung (Stage 2) konvergiert dieser Ansatz besonders schnell und ressourcenschonend. Dabei wird eine Zielfunktion verwendet, die für jeden Versuchsdurchgang die erreichte Abtragtiefe, die Oberflächenrauheit sowie die Produktivität ermittelt und bewertet. Ziel der Bayes´schen Optimierung ist es, möglichst schnell durch Exploration und Exploitation ein globales Minimum für die gegebene Zielfunktion zu identifizieren, ohne dabei das gesamte Parameterfeld experimentell abtasten zu müssen (siehe **ABB. 2**).
In Stage 3 werden die gesammelten historischen Prozessdaten der vorangegangenen Experimente zum Training eines künstlichen neuronalen Netzwerks (KNN) herangezogen. Das KNN dient anschließend während des Betriebs als Prozessmodell. Auf Basis des künstlichen neuronalen Netzwerks und einem eigens entwickelten Optimierer können Parametervorhersagen ohne experimentellen Aufwand während der Bearbeitung getroffen und somit der Laserprozess auch im Betrieb optimiert werden.

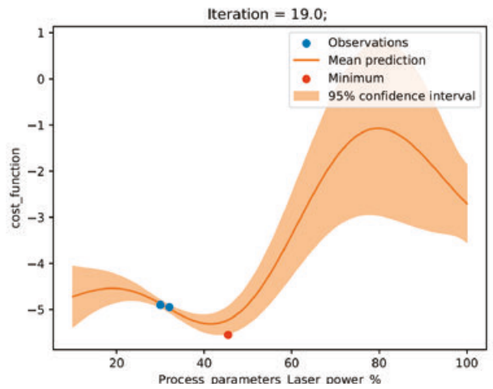



ABB.2: Verlauf der Bayes´schen Optimierung (Stage 1).

Die Funktionalität und Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems wurden bereits anhand experimenteller Versuche nachgewiesen. Zukünftig soll das System beim Industriepartner LightPulse im industriellen Produktivbetrieb integriert werden.

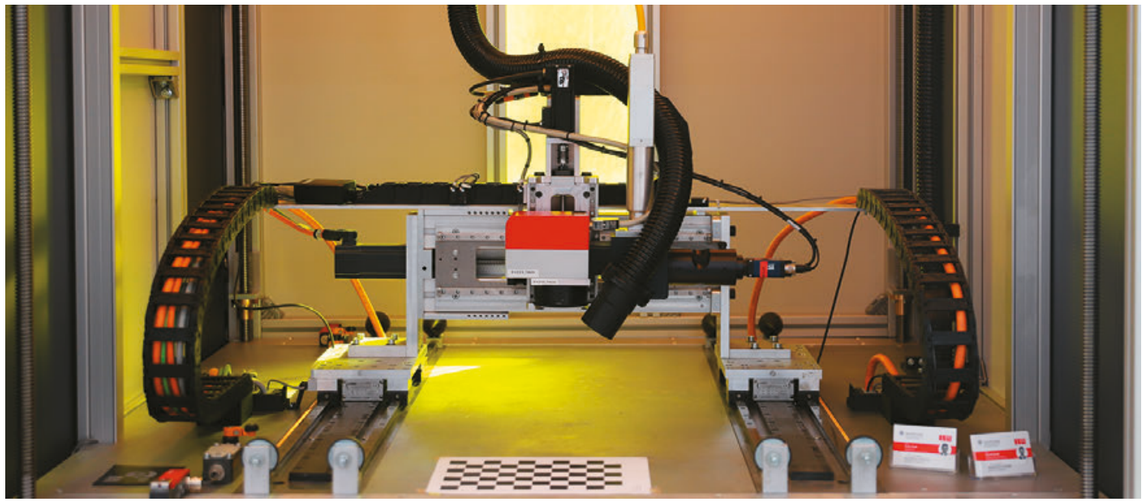
**Projektpartner:** IFSW, LightPulse LASER PRECISION

**Kontakt:**
Colin Reiff, M.Sc.
colin.reiff@isw.uni-stuttgart.de

## ZUKUNFTSLABOR FÜR UNIVERSELLE LASERBEARBEITUNG

**GEFÖRDERT VOM MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST BADEN-WÜRTTEMBERG (MWK) IM RAHMEN DES INNOVATIONS-CAMPUS „MOBILITÄT DER ZUKUNFT“ (ICM)**

**Ein Schwerpunkt der Forschung im Rahmen des ICM liegt auf der universellen Laserbearbeitung. Durch die erreichten Leistungssteigerungen bei Strahlquellen können mittlerweile unterschiedliche Verfahren vom hochpräzisen Laserabtragen bis hin zu Laserschweißen durchgeführt werden. Diese Universalität des Lasers kann bisher jedoch nur unter Verwendung unterschiedlicher Laserquellen, wie ultrakurzgepulste (UKP) und continuous-wave (CW) Laser, realisiert werden. Dadurch sind Prozesskombinationen und Anwendungen in deren technischen Umsetzung deutlich eingeschränkt. Um diese Hürde zu überwinden, ist es das Ziel des Zukunftslabors, eine universelle Laserquelle sowie deren Steuerung und Anwendung zu erforschen.**



Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die gesamte Bandbreite der Laserbearbeitung, von der Strahlquelle über Prozessführung und Steuerung bis hin zur Diagnostik abzudecken (siehe **ABB. 1**). Das Kernstück bildet eine universelle Laserquelle, welche, basierend auf einem schnell zwischen CW und UKP umschaltbaren Verstärker, aufgebaut wird. Das schnelle Umschalten wird mittels akustooptischer Modulatoren (AOM) und Polarisationsmultiplexing realisiert, wobei die erforderliche Abfolge von CW- und UKP-Laserstrahlung auf dem Werkstück über die steuerungstechnische Synchronisation der AOMs realisiert wird. Die Basis für die Untersuchung kombinierter Laserprozesse bildet ein modulares Bearbeitungszentrum, welches auf Grundlage einer experimentellen Powder Bed Fusion Anlage realisiert wird. Essentiell für eine effiziente Verfahrensweiterentwicklung ist die nahtlose Integration eines flexiblen Diagnostiksystems zur In-Prozess Qualitätsüberwachung. Hierzu werden moderne Messsysteme wie die optische Kohärenztomographie und Thermokameras in den Strahlengang integriert. Durch ein modulares Kinematiksystem können die Abhängigkeiten zwischen unterschiedlichen Kinematik-Konfigurationen und Prozessgrößen für die unterschiedlichen Verfahren untersucht werden. Die Verwendung einer offenen, hochfrequenten und wandlungsfähigen Steuerungsarchitektur stellt sicher, dass eine anpassbare und erweiterbare Anlagensteuerung die notwendigen Eingriffsmöglichkeiten bietet und folglich die Interoperabilität gewährleistet wird.
Die Steuerungsarchitektur wird mit industriellen Komponenten aufgebaut und durch Field Programmable Gate Arrays (FPGA) erweitert, um den hohen zeitlichen Anforderungen der Laserprozesse im Mikrosekunden-Bereich gerecht zu werden.
Eine schnelle und flexible Anpassung der Prozessparameter (z.B. Laserleistung und Scangeschwindigkeit) ist eine Grundvoraussetzung für die universelle Laserbearbeitung. Bisherige Steuerungssysteme im Bereich der Laserbearbeitung sind hinsichtlich dieser Beeinflussungsmöglichkeiten jedoch stark limitiert. Ursache ist oftmals nicht zugängliche, nicht echtzeitfähige Schnittstellen der existierenden Steuerungssysteme. Daher bedarf es einer echtzeitfähigen offenen Steuerungsplattform für die universelle Laserbearbeitung, die am ISW erforscht, entwickelt und realisiert wird.

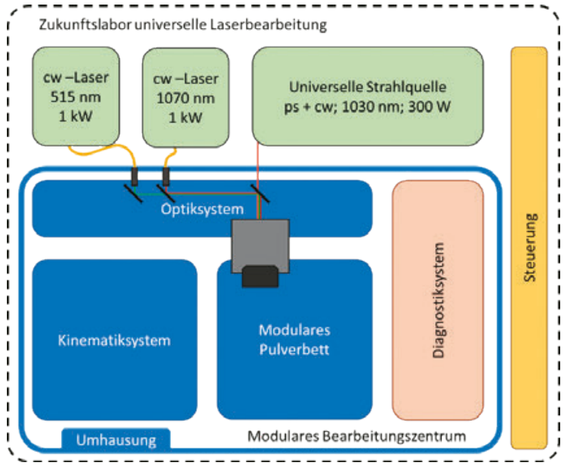



ABB.1: Schematische Darstellung der Gesamtarchitektur.

**Projektpartner:**

**Kontakt:**
Colin Reiff, M.Sc.
colin.reiff@isw.uni-stuttgart.de

LageRegelSeminar

**Lageregelseminar**

Auf der zweitägigen Veranstaltung geben unsere Referenten aus Industrie und Forschung einen spannenden Überblick zu aktuellen Forschungsergebnissen und Entwicklungen aus der Robotik, Antriebs- und Maschinentechnik und der Additiven Fertigung. Hierfür werden praxisbezogene experimentelle Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

Weitere Informationen zur Veranstaltung finden Sie unter:

**www.lageregelseminar-stuttgart.de**

ORGANISATION ISW
VERANSTALTER IFSW

# FEMTOSEKUNDEN 5D DRUCK AUF FREIFORMFLÄCHEN MIT SUBMIKROMETER-PRÄZISION FÜR OPTISCHE SENSOREN (5D Linsendruck)

**GEFÖRDERT VOM MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST BADEN-WÜRTTEMBERG (MWK) IM RAHMEN DES INNOVATIONS-CAMPUS „MOBILITÄT DER ZUKUNFT“ (ICM)**

**In diesem Forschungsprojekt werden Methoden untersucht, wie der additive Herstellungsprozess von Mikrooptiken in Hinblick auf die flexible und individuelle Massenfertigung produktiver gestaltet werden kann. Hierzu kommen günstige Linsenrohlinge zum Einsatz auf welche dann die gewünschte komplexe Linsengeometrie gedruckt wird.**

**Hintergrund:** In vielen Bereichen, wie z.B. der Automobilindustrie, gewinnt die optische Sensortechnik an immer größerer Bedeutung. Mit dem einhergehenden steigenden Bedarf an optischer Sensortechnik steigen auch die Anforderungen an entsprechende optische Systeme, um z.B. Fahrassistenzsysteme zu ermöglichen. Aus diesem Grund forscht das 4. Physikalische Institut der Uni Stuttgart (PI4) seit einer knappen Dekade an der Herstellung von komplexen Mikrooptiken (siehe **ABB. 1**). So ist es diesem z.B. gelungen, Nah- und Weitwinkelaufnahmen mit nur einem Sensor zu erstellen, indem unterschiedliche Optiken direkt auf einen CMOS Sensor gefertigt wurden.

Zur Herstellung solcher komplexen Linsen kann das 2-Photonen-Polymerisations (2PP) 3D Druck Verfahren verwendet werden. Bei diesem härtet ein hoch fokussierter Laserstrahl, einzelne 3D Pixel (so genannte Voxel) in einem speziellen Harz aus. So können Strukturen Schicht für Schicht in einem 2.5D Vorgehen erstellt werden (siehe **ABB. 2**). Ein sehr „großer“ Vorteil hierbei ist die im Mikro- bis Nanometer Bereich erreichbare Auflösung. Zwar ist es mit dem 2PP Prozess möglich, flexibel und individuell Mikrooptiken mit hohen Anforderungen an die Oberflächengüte und das Optikdesign herzustellen, dafür dauert der Druckprozess bei „größeren“ Optiken (z.B. 1 mm Durchmesser) oft mehrere Stunden.

Genau hier setzt das Forschungsprojekt mit dem Titel „Femtosekunden 5D Druck auf Freiformflächen mit Submikrometer-Präzision für optische Sensoren“ (kurz: 5D Linsendruck) an. Im Rahmen des vom „InnovationsCampus Mobilität der Zukunft“ (ICM) geförderten Projektes wird ein Ansatz untersucht, welcher die Herstellung von Mikrooptiken mittels 2PP produktiver machen soll. Konkret sollen günstige Glashalbkugellinsen (so genannte sphärische Linsen) als Ausgangspunkt für den Druckprozess verwendet werden. Diese dienen dann als Rohling auf welchen die komplexe Linsengeometrie (die so genannte Asphäre) aufgedruckt wird (siehe **ABB. 3**). Hierdurch werden die nicht idealen Abbildungseigenschaften der sphärischen Linse kompensiert, Druckzeit und Druckmaterial eingespart und vorhandene Vorteile des Herstellungsprozesses beibehalten.

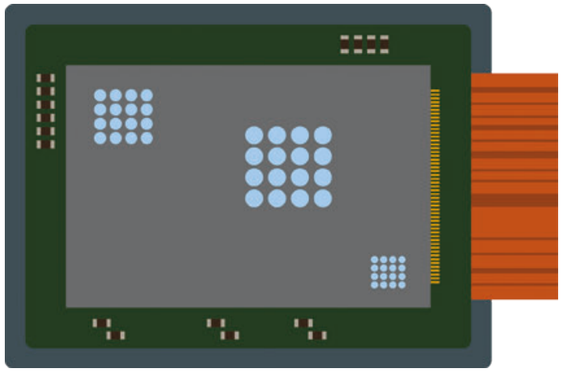


ABB.1: Dargestellt ist eine schematische Abbildung eines mit drei verschiedenen Linsenarrays bedruckten Bildsensors. Hierdurch kann z.B. eine Nah- und Weitwinkelaufnahme mit nur einem Sensor realisiert werden.[1].

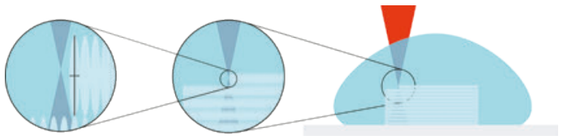


ABB.2: Schematische Darstellung des 2PP Druckprozesses: Der hoch fokussierte und kegelförmige Laser (rot) härtet genau im Fokuspunkt einzelne 3D-Pixel – Voxel – (weißlich) aus. Somit können in dem Harz (hellblau) Schicht für Schicht Bauteile erzeugt werden. [1]

**Problemstellung:**

Das Vorhaben ist aber mit einigen Problemen verbunden:

Erstens: Beim Beschreiben des Rohlings wird der hoch fokussierte und deswegen konisch geformte Laserstrahl in manchen Bereichen durch den Rohling selbst gebrochen (siehe **ABB. 4**). Zum aktuellen Zeitpunkt ist nicht klar, wie sich diese Brechung des Laserstrahls durch den Rohling auf den Druckprozess und somit auf die optischen Eigenschaften der gedruckten Mikrooptiken auswirkt. Ein Ansatz dieses Problem zu beheben, besteht darin, den Rohling während des Druckprozesses kontinuierlich zu kippen.

Zweitens: Das kontinuierliche Kippen des Rohlings im Druckprozess erfordert, dass der konventionelle 3-achsige Druckprozess (2.5D), durch zwei Rotationsachsen auf 5 Achsen („5D“) erweitert wird. Da auf dem Markt keine 2PP Druckanlagen mit 5 Achsen verfügbar sind, muss eine solche geschaffen werden.

Drittens: Neben der Entwicklung einer 5-achsigen Druckanlage muss auch ein Werkzeug für die 5-achsige Bahnplanung des 2PP Druckprozesses geschaffen werden. Dieses soll im ersten Schritt auf den spezifischen Anwendungsfall des Bedruckens von Linsenrohlingen abgestimmt werden.

Probleme 1-3 fallen in den Expertisenbereichs des Instituts für Steuerungstechnik, das langjährige Erfahrung mit unterschiedlichen additiven Fertigungsverfahren und deren mehrachsigen Anwendung hat. Der Erfahrungsschatz deckt dabei sowohl den Anlagenbau, die Anlageninbetriebnahme als auch die Entwicklung der zugehörigen Softwarekomponenten ab.

Viertens: Im Anschluss zur Entwicklung des 5-achsigen Druckprozesses gilt es, diesen in Zusammenarbeit zwischen dem ISW und dem PI4 anhand von Druckbeispielen im Labor zu validieren.

Fünftens: Parallel zu den Schritten 1-4 soll eine sensorbasierte Anwendung für asphärisch gedruckte Linsen entwickelt werden. Ziel hier ist, die komplette Anwendung von Sensordesign bis Datenaufbereitung zu entwickeln.

Die Entwicklung erfolgt durch das Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Sie können hier ihr umfangreiches Wissen in Bereich optische Sensorik, Design und Simulation mikrooptischer Systeme und Methoden der künstlichen Intelligenz anwenden.

**Quellen:**

[1] Kurth, D.; Ristok, S.; Ruehle, S.; Verl, A.; Giessen, H.: Multiaxis two photon polymerization machine and software concept for the manufacturing of aspheric lenses on non-planar substrates, 16th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME ,22 Virtual Conference, 13-15 July 2022, Procedia CIRP, Isevier, ISSN: 2212-8271, (in print).

ABB.3: Links dargestellt ist der sphärische Linsenrohling (hellblaue Halbkugel) auf welcher ein Tropfen Fotolack (hellblau) platziert ist. Der kegelförmige Laser (rot) deutet die zu schreibende asphärische Kontur (dunkelblau) an. Rechts ist die fertig gedruckte Linse dargestellt [1].

ABB.4: Links ist dargestellt, wie der Laser (rot) beim Bedrucken des Rohlings (hellblau) in Bereichen (gelb) durch diesen selbst gebrochen bzw. verschattet wird. Rechts ist dargestellt, wie durch ein relatives Neigen von Rohling und Laser zueinander das Problem umgangen werden kann [1].

**Ziel:**

- Entwicklung einer 5-achsigen 2PP Druckanalge
- Entwicklung eines Bahnplanungswerkzeuges für den 5-achsigen Druck von Mikrooptiken mittels sphärischen Rohlingen.
- Validierung des 5-achsigen Druckprozesses
- Entwicklung einer sensorbasierten Anwendung für asphärisch gedruckter Linsen

**Ergebnisse:**

Hier erste Zwischenergebnisse zum Forschungsprojekt:

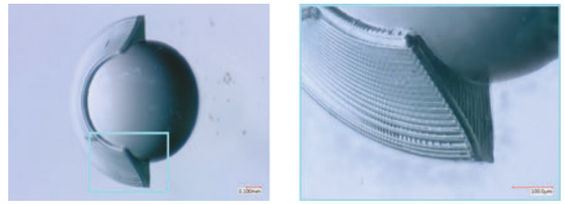


ABB.5: Zwischenergebnisse: Links dargestellt ist der erste Versuch einen Linsenrohling mit 1 mm Durchmesser mit einer asphärischen Kontur zu bedrucken. Der Druckvorgang ist nach circa 60 % abgebrochen. Zur Anschauung wurde nur eine Hälfte bedruckt.

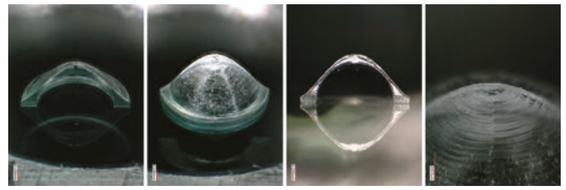


ABB.6: Dargestellt sind Mikroskopaufnahmen einer mit dem 5-Achssystem gedruckten Linsenasphärisierung ohne einen Rohling. Auch hier ist zur Anschauung nur eine Hälfte der Asphärisierung gedruckt worden.

**Projektpartner:**

Universität Stuttgart
4. Physikalisches Institut

KIT Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Technik der Informationsverarbeitung
ITIV

**Kontakt:**
Daniel Kurth, M.Sc.
daniel.kurth@isw.uni-stuttgart.de

# GREY-BOX-DYNAMIKMODELLIERUNG MECHATRONISCHER GESAMTSYSTEME

**GEFÖRDERT VOM MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST BADEN-WÜRTTEMBERG (MWK) IM RAHMEN DES INNOVATIONS-CAMPUS „MOBILITÄT DER ZUKUNFT“ (ICM)**

**Die Genauigkeitssteigerung der Industrieroboter und Werkzeugmaschinen erfolgt auf Basis hochgenauer Dynamikmodelle, die exaktere Vorhersagen über das Systemverhalten liefern. Zur genaueren Modellierung werden Grey-Box-Modelle, also Mischformen aus analytischen White-Box-Ansätzen und Machine Learning (Black-Box-Ansätzen), verwendet. Dies betrifft einerseits die Modellierung selbst, aber auch die Verwendung solcher Modelle zur Antriebsregelung und Fehlerkompensation. Daher erforscht dieses Projekt die Nutzung von Grey-Box-Dynamikmodelle, um die Gesamtmaschine dynamisch genau abzubilden und die Fertigungsqualität auf diversen Kinematiken bei erhöhtem Durchsatz zu steigern.**

**Problemstellung:**
Präzisere Dynamikmodelle von Maschinen sind die Voraussetzung für eine immer schnellere und dynamisch genauere Fertigung. Die erzielbare Genauigkeit, Bearbeitungsgeschwindigkeit und Ausschussquote sind dabei durch die Qualität der Modellierungs- und Identifikationsmethodik begrenzt.
Der klassische Ansatz hierfür ist eine analytische White-Box-Beschreibung, scheitert für umfangreiche Systeme jedoch sowohl an der mit der Modellierungstiefe rasch anwachsenden Gesamtkomplexität, welche die Identifizierbarkeit beeinflusst, als auch an maschinenspezifischen Ausprägungen, die eine erneute Identifikation an jeder Maschine erfordern.
Eine Alternative stellen Black-Box-Modelle, rein datengetriebene, modellfreie Beschreibungen dar. Dabei geht allerdings die Interpretierbarkeit der Ergebnisse verloren. Gleichzeitig sind zum Training der Black-Box-Modelle eine große Menge an Trainingsdaten notwendig. Das bekannte Modellwissen wird hierfür verworfen.
**Lösungsansatz:**
Im Rahmen des Projekts soll die Nutzung von Greybox-Modellen zur Dynamikmodellierung untersucht werden. Hierfür wird die analytische Kinematik- und Dynamikbeschreibung beibehalten und in einem zweiten Schritt durch datengetriebene Modelle ergänzt. Diese werden auf den verbleibenden Modellfehler trainiert, was die Konvergenz der Verfahren begünstigt. Bei geringem Modellvertrauen des datengetriebenen Teils in Bereichen des Zustandsraums, in denen beispielsweise wenige Trainingsdaten vorliegen, kann über die analytische Modellierung dennoch eine Vorhersage getroffen werden, beispielsweise für die Regelung. Durch die White-Box-Modellierung kann zudem der Zustand des analytischen Modells zum Training genutzt werden, wodurch weitere (relevante) Modelleingänge zur Verfügung stehen.
Offene Fragestellungen in diesem Thema sind neben der Art der Modellierung und Identifikation für Black- und White-Box-Modelle die Definition einheitlicher Schnittstellen zum Training der Verfahren, Robustheits- und Stabilitätsuntersuchungen der Grey-Box-Modelle sowie die echtzeitfähige Anwendung in der Steuerung.

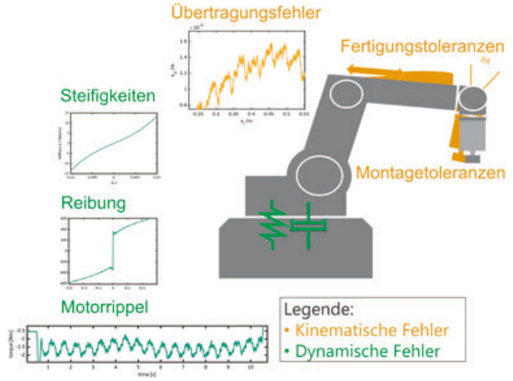



ABB.1: Einfluss kinematischer und dynamischer Fehler auf die dynamische Genauigkeit eines Industrieroboters, die für Regelung und Bahnplanung bisher in der Regel nicht berücksichtigt werden.

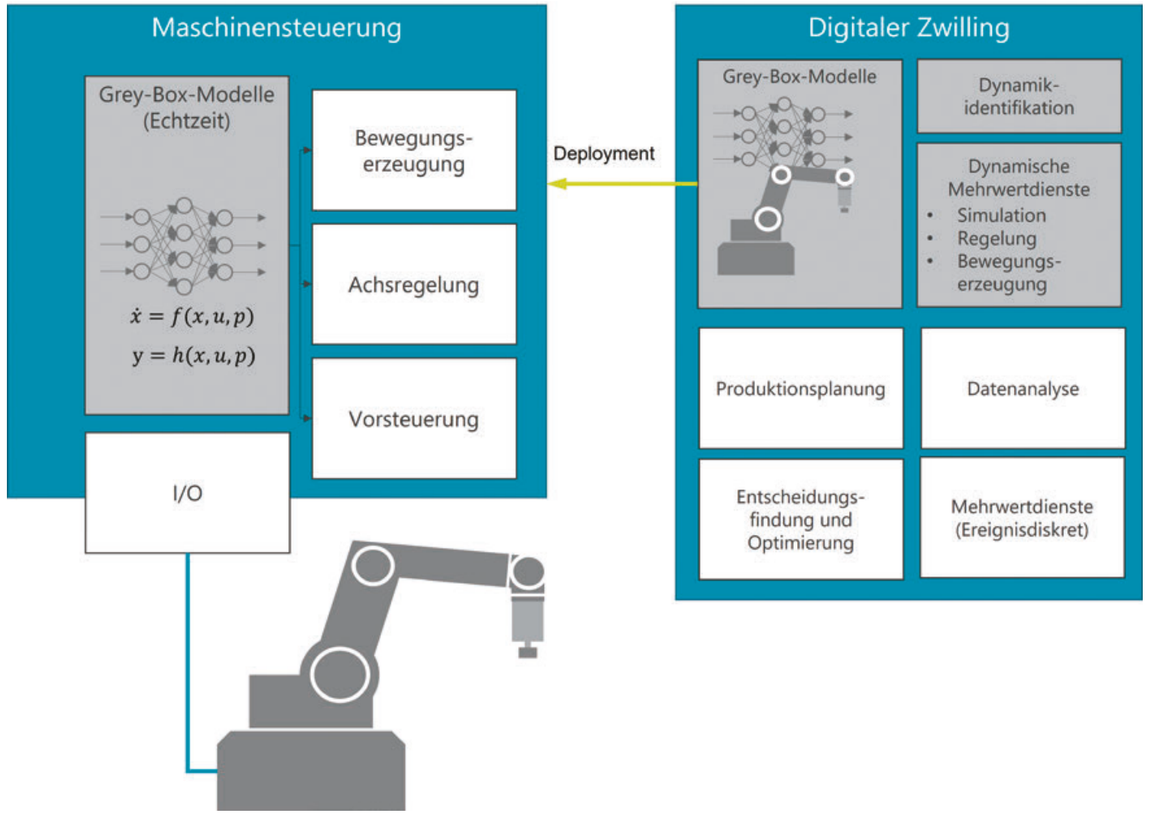



ABB.2: In die Maschinensteuerung integrierte Grey-Box-Modelle.

**Erwartete Ergebnisse:**
- Dynamisch genauere Abbildung der Gesamtmaschine durch Grey-Box-Modellierung.
- Verwendung der genaueren Dynamikmodelle für modellbasierte Regelungsverfahren, Trajektorienplanung und Vorsteuerung.
- Automatisierte Modellgenerierung und Identifikationszyklen.
- Deployment in echtzeitfähige, industrielle Steuerungsumgebung.
- Praktische Validierung an verschiedenen Maschinen.

**Kontakt:**
Christoph Hinze, M.Sc.
christoph.hinze@isw.uni-stuttgart.de

Haijia Xu, M.Sc.
haijia.xu@isw.uni-stuttgart.de

## INNOVATIONCHALLENGE EASY METAL PRINTER (EMP)

**GEFÖRDERT VOM MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST BADEN-WÜRTTEMBERG (MWK) IM RAHMEN DES INNOVATIONS-CAMPUS „MOBILITÄT DER ZUKUNFT“ (ICM)**

**Das Laserauftragsschweißen mit Draht ist eine im Aufschwung befindende Technologie für den 3D-Druck von Bauteilen aus verschiedenen Metallen. Eine hohe Zuverlässigkeit schon beim ersten Bauteil kann bei den etablierten Bahnplanungsverfahren aber nicht erreicht werden, da das komplexe Zusammenspiel vom Schmelzbad mit seiner Umgebung nicht mit vertretbarem Aufwand vorausberechnet werden kann. Ziel dieses Projekts ist, durch eine Regelung während des Druckverfahrens mit einer iterativen Bahnplanung die Anwendbarkeit und Produktivität des Prozesses zu steigern.**

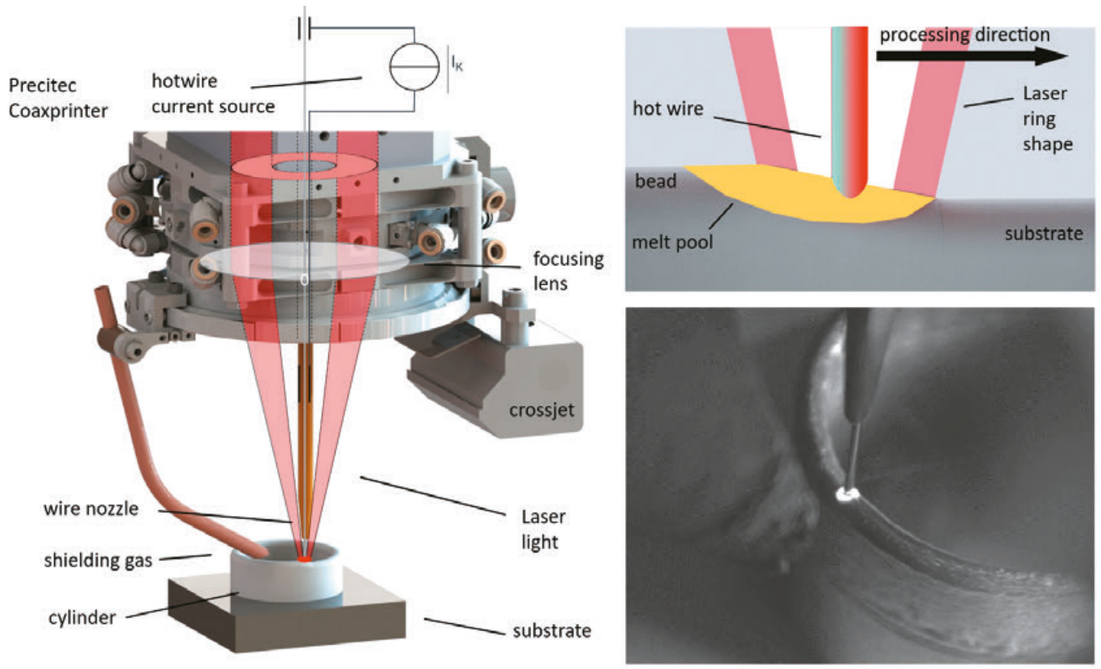



ABB.1: Funktionsweise des Druckkopfes, [Quelle: IFSW].

Im Easy Metal Printer Projekt widmet sich das EMP zusammen mit den Partnern von Institut für Strahlwerkzeuge und der Firma Precitec der Optimierung des wire-DED Prozesses, also dem Laserauftragsschweißen mit Drahtzufuhr. Das von Precitec entwickelte Verfahren hat den entscheidenden Vorteil gegenüber anderen drahtgestützen Druckverfahren, dass der Draht nicht von einer Seite in den Laserstrahl geführt wird, womit sich das Verfahren abhängig von der Druckrichtung unterschiedlich verhält, sondern der Laser koaxial um einen senkrecht zugeführten Draht geformt wird. Dadurch werden die Druckeigenschaften weitgehend richtungsunabhängig. Ein elementares Problem besteht aber in der Kontrolle des Schmelzbades. Durch die geringe Viskosität ist das Verhalten der Schmelze stark von der Schwerkraft und den





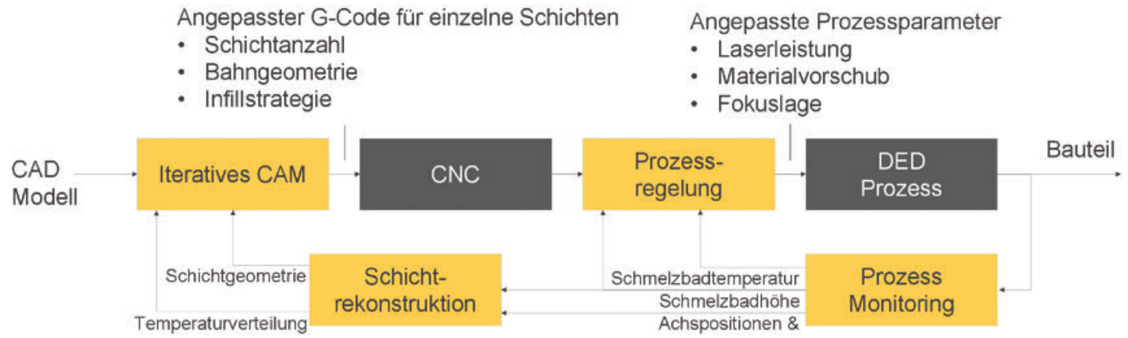



ABB.2: Das Konzept der iterativen Bahnplanung.

Bedingungen in seiner direkten Umgebung (benachbarte Bahnen, Temperatur, Absorption, etc.) abhängig. Insbesondere die lokalen Bedingungen zu jedem Zeitpunkt des Drucks sind dabei nur sehr aufwändig und mit geringer Genauigkeit vorherzusehen, da sie aufwendige Prozessmodelle und Simulationen in verschiedenen Domänen erfordern würden. Folglich sind die von der Bahnplanungssoftware geplanten Bahnen nur in den seltensten Fällen optimal für das Bauteil und führen häufig zu Fehlern (Einschlüsse, Löcher, Eigenspannungen, etc.) oder sogar zum Prozessabbruch.
Das ISW forscht daher im EMP Projekt nach Möglichkeiten den Prozess auch ohne aufwändige Vorsimulationen zu planen. Der Ansatz dazu ist eine iterative Bahnplanung. Bei diesem Ansatz wird der Druckprozess immer nur für eine Schicht geplant und diese Schicht direkt gedruckt. Messdaten aus dem Prozess (Schmelzbadgeometrie und Temperatur) werden dann genutzt um noch während dem Druck ein Modell dieser Schicht zu rekonstruieren und für die Planung der nächsten Schicht zur Verfügung zu stellen. Die Bahnplanung kann dadurch auf Abweichungen des Prozesses schon in der nächsten Schicht reagieren und Fehler ausgleichen oder die Temperaturverteilung optimieren. Die zurückgeführten Messdaten ersetzen somit die teuren Simulationen und erlauben eine wesentlich weitgehendere Kontrolle über den Prozess als es den herkömmlichen Prozessregelungen möglich ist.
Ziel des Projektes ist, mit dieser Methode auch völlig neue Bauteile schon beim ersten Versuch erfolgreich drucken zu können.

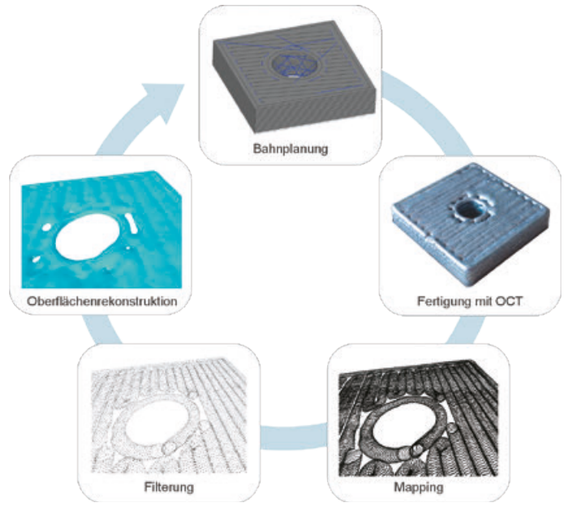



ABB.3: Oberflächengeometrierekonstruktion aus Spurhöhen-Messdaten.

**Kontakt:**
Martin Wolf, M.Sc.
martin.wolf@isw.uni-stuttgart.de

## SOFTWARE-DEFINED MANUFACTURING FÜR DIE FAHRZEUG- UND ZULIEFERINDUSTRIE (SDM4FZI)

GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK) IM RAHMEN DES FÖRDERPROGRAMMS „ZUKUNFTSINVESTITIONEN IN DER FAHRZEUGINDUSTRIE“

**Hochvolatile Märkte, unsichere Lieferketten und der allgemeine Wandel hin zur Elektrifizierung in der Automobilindustrie fordern die Produktionstechnik heraus. Software-defined Manufacturing flexibilisiert Produktionssysteme und ermöglicht dadurch den Bau einer wandlungsfähigen Fabrik.**

ABB.1: Quelle © BOSCH

Flexibler, schneller, effizienter: Das steht bei Entwicklung von Produktionssystemen auf der Wunschliste der Automobil- und Zulieferindustrie ganz oben. Die Produktionsmittel der Branche werden seit Jahrzehnten hinsichtlich dieser Kriterien optimiert und weiterentwickelt. Entsprechend sind Quantensprünge nur durch einen Paradigmenwechsel herbeizuführen. Die Art und Weise wie heute produziert wird muss grundlegend hinterfragt werden. Dieses Ziel haben sich die Teilnehmer des Forschungsprojektes „Software-defined Manufacturing für die Fahrzeug- und Zulieferindustrie (SDM4FZI)“ gesetzt. Unter der Koordination von Bosch und des Instituts für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen wollen insgesamt 30 Partner aus Industrie und Forschung die erforderlichen Grundlagen erarbeiten. Das Ziel besteht darin, einzelne Komponenten bis hin zu ganzen Produktionsnetzwerken flexibel durch Software planen, steuern und verändern zu können. Dies ebnet der Produktionstechnik den Weg, trotz hoher Marktvolatilität, unsicheren Lieferketten und starken Wandlungstreibern, produktiv zu fertigen. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) fördert das Forschungsprojekt mit rund 35 Millionen Euro.

**Kontakt:**
Michael Neubauer, M.Sc.
michael.neubauer@isw.uni-stuttgart.de



CODESYS

Lieferprobleme?
CODESYS Virtual Control SL ist immer verfügbar!

iStockphoto.com | luamduan

Das IEC-61131-3-kompatible Laufzeitsystem CODESYS Virtual Control SL lässt sich auf beliebigen Architekturen mit Container oder Hypervisor/VM installieren – bei Bedarf beliebig oft und mit skalierbarer Performance.

Somit realisieren Sie problemlos virtuelle Steuerungen, die mit allen bekannten Eigenschaften von CODESYS ausgestattet sind und mit dem CODESYS Development System in den Sprachen der IEC 61131-3 programmiert werden.

codesys.com/runtime

CODESYS Group | We *software* Automation.

Anfragen zur kostenfreien Übersendung von Belegexemplaren oder zwecks redaktioneller Mitarbeit richten Sie bitte an

**Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV)**
Finkenstraße 10 · D–68623 Lampertheim
**www.institut-wv.de**

Telefon 06206 939-0 · info@alphapublic.de



# ORCHESTRIERUNG CLOUD-BASIERTER STEUERUNGSTECHNIK

**GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK) IM RAHMEN DES FÖRDERPROGRAMMS „ZUKUNFTSINVESTITIONEN IN DER FAHRZEUGINDUSTRIE“**

**Die Komplexität der Anwendung von starrer Hardware in flexible Software zu verlegen. Das ist der Paradigmenwechsel mit dem sich das Forschungsprojekt SDM4FZI beschäftigt. Ziel ist eine flexible, wandlungsfähige und dynamische Produktion um Unsicherheit und Volatilität zu begegnen. Dies erfordert eine neue technologische Infrastruktur, die auf dem konsequenten Einsatz von konvergenter Kommunikationstechnik und Echtzeit-Virtualisierung beruht. Zur Verwaltung virtualisierter Echtzeit-Steuerungsanwendungen sind Erweiterungen von Orchestrierungswerkzeugen notwendig, die Cloud-Computing um den notwendigen Determinismus erweitern.**

Software-defined Manufacturing (SDM) ist ein neues Paradigma für die Fertigung im Kontext der Industrie 4.0. Der Ansatz erfordert ein grundlegendes Umdenken und die Neuerfindung zentraler Vorgänge und Elemente der Produktionstechnik, insbesondere der operativen Technologie (OT). Bei der Realisierung wandlungsfähiger Produktionssysteme auf Basis von SDM kommen die klassischen, starr und hierarchisch strukturierten Architekturen der Automatisierungspyramide schnell an ihre Grenzen, sind die hier verwendeten Softwaresysteme und Kommunikationsinfrastrukturen doch träge und nicht für häufige Updates ausgelegt. Während im Bereich der IT kontinuierliches Development und kontinuierliche Integration bereits seit Jahren Stand der Technik sind, lassen sich diese Konzepte nur bedingt auf die Automatisierungstechnik übertragen. Grund hierfür ist, dass unvorhersagbare Ausfälle von Teilsystemen im produktionstechnischen Umfeld, insbesondere unter Echtzeitanforderungen, nicht akzeptabel sind.
Echtzeitfähige, Service-orientierte Architekturen (SOAs) schaffen hier Abhilfe. Diese sind ein Architekturstil zur Realisierung modularer, verteilter Systeme, in denen Komponenten, die als Services bezeichnet werden, einander Funktionalitäten zur Verfügung stellen. Eine kohäsive Anwendung ist dabei eine Kombination mehrerer Services. Zur Kapselung von Services eignet sich besonders die Virtualisierung auf Ebene des Betriebssystems (Container-Virtualisierung). Deren Vorteile lassen sich wie folgt zusammenfassen: Durch den Betrieb mehrerer virtueller Server oder Applikationen auf wenigen physischen Hardwareressourcen kann eine Senkung der Betriebskosten erreicht werden, indem virtuelle Server oder Applikationen mit sich ergänzenden Ressourcenbedarfsprofilen auf einem physikalischen Rechnerknoten betrieben werden (vgl. **ABB. 1**). Weil ganze virtuelle Server oder aber einzelne Services zwischen den physikalischen

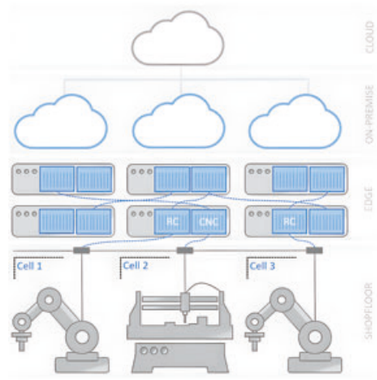



Abb.1: Infrastruktur für Software-Defined Manufacturing.

Server migriert und repliziert werden können, wird ein unterbrechungsfreier Betrieb bei Datensicherung, Hardware-Upgrades und Ausfällen möglich. Um die Vorteile von Service-orientierter Steuerungsarchitekturen vollständig ausnutzen zu können, wird ein echtzeitfähiges, deterministisches Verfahren zum kontinuierlichen Deployment benötigt, welches umgesetzt und in die Stuttgarter Maschinenfabrik integriert wurde. Um eine deterministische Durchführung dieser Updates zu realisieren, wird ein eigens entwickelter Kubernetes-Echtzeit-Controller in Kombination mit einer webbasierten Oberfläche eingesetzt, der eine unterbrechungsfreie Aktualisierung von Steuerungsanwendungen bei konsistenter Zustandsübertragungen zwischen alter und neuer Version ermöglicht.

**Kontakt:**
Moritz Walker, M.Sc.
moritz.walker@isw.uni-stuttgart.de

# REFERENZMODELL FÜR SOFTWARE-DEFINED MANUFACTURING: UMSETZUNG MITTELS VERWALTUNGSSCHALEN

GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK) IM RAHMEN DES FÖRDERPROGRAMMS „ZUKUNFTSINVESTITIONEN IN DER FAHRZEUGINDUSTRIE“

**Im Fertigungsumfeld ist ein Asset ein wertstiftendes Objekt für eine Organisation. Die kann eine Maschine, ein Sensor oder eine Softwarelizenz sein. Auch eine gesamte Produktionshalle oder ein Fertigungsstandort sind Assets. Im Produktionskontext sind die zu abzubildenden Assets Produkte, Prozesse und Ressourcen. Die Beziehungen dieser Aspekte zueinander werden durch ein Referenzmodell definiert. Um diese zur Realisierung von Software-defined Manufacturing abbilden zu können, werden in diesem Teilprojekt die zu modellierenden Produkte, Prozesse und Ressourcen, als Verwaltungsschalen umgesetzt.**

Digitale Zwillinge sind Abbildungen von Assets. Um diese virtuell beschreiben zu können, muss der digitale Zwilling relevante Daten und Informationen zu den Objekten beinhalten. In der „Stuttgarter Maschinenfabrik“ werden die digitalen Zwillinge in Form von Verwaltungsschalen (VWS) nach dem Standard der Industrial Digital Twin Association (IDTA) umgesetzt. Die VWS dient als Schnittstelle zu dem realen Asset und enthält die Daten des Assets auf eine standardisierte strukturierte Weise. Daten aus dem Betrieb können in die VWS zurückgespielt werden. Die zur Realisierung der flexiblen Fertigung notwendigen digitalen Zwillinge der Produktion, d.h. von Produkt, Prozess und Ressource, werden realisiert, indem notwendige Modelle und Submodelle im Rahmen eines Referenzmodells entwickelt werden.

**Flexible Fertigung des konfigurierbaren Produkts**

Das konfigurierbare Beispielprodukt der Stuttgarter Maschinenfabrik ist das „Multi-Tool“. Nach dessen Konfiguration wird automatisiert ein CAD-Modell des zu fertigenden Produkts erstellt und eine VWS angelegt, welche die Konfigurationsdaten, die resultierenden Konstruktionsdaten und das CAD-Modell beinhaltet. Die VWS dient als Basis für die darauffolgenden Schritte der Produktion. Im nächsten Schritt wird die Produktion geplant. Hierfür wird die Planungslogik mit den Daten in der VWS des konfigurierten Produkts und den Informationen über verfügbare Maschinen und deren Fähigkeiten und Eigenschaften gefüttert. Das Resultat der Produktionsplanung ist der Produktionsplan des Multi-Tools, welcher in der VWS der Instanz abgelegt wird. Ausgehend von dem Produktionsplan wird das Produkt gefertigt und die Produktions- und Qualitätsdaten in der VWS gespeichert.

Fällt eine Maschine aus, oder ist die Qualität des ausgeführten Produktionsschritts nicht ausreichend, wird die Produktion im Betrieb umgeplant, sodass das Produkt in der vorgesehenen Qualität gefertigt wird. Auch diese Daten werden in die VWS des Produkts integriert.

ABB.1: Maschine der Maschinenfabrik mit Verwaltungsschale.

In die „Stuttgarter Maschinenfabrik“ sind verschiedenen Maschinen integriert, welche unterschiedliche Fertigungstechnologien ermöglichen: Mehrere Fräsmaschinen für die zerspanende Bearbeitung, ein hybrider Roboter, der additiv und subtraktiv fertigen kann, ein Laserbearbeitungszentrum sowie ein fahrerloses Transportsystem für den Transport des herzustellenden Produkts zwischen den Maschinen.

**Verwaltungsschalen der Maschinen**

Für jede Maschine existiert eine VWS mit den Informationen der Maschine und ihrer Komponenten. Durch die VWS können statische Informationen und auch Betriebsdaten dieser Maschine eingesehen und geändert werden. Bearbeitet die Maschine das Produkt, wird der Status der Maschine in der VWS von „bereit“ auf „produzierend“ geändert. Der Status wird bei der Produktionsplanung verwendet.

Ein Ziel der „Stuttgarter Maschinenfabrik“ ist, die Herstellung eines Produkts durchgängig abzubilden, von der Konfiguration, über die Produktionsplanung, die Prozesssimulation, die Fertigung und die Integration von Fertigungs- und Qualitätsdaten in die virtuelle Abbildung. Für die Fertigungsplanung, -durchführung und -auswertung müssen neben dem herzustellenden Produkt auch die Maschinen der Fabrik und die Prozesse virtuell abgebildet werden und durch die Daten der Herstellung ergänzt werden.

ABB.2: Ein Multi-Tool.

**Kontakt:**
Rebekka Neumann, M.Sc.
rebekka.neumann@isw.uni-stuttgart.de

Universität Stuttgart
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen

**Wir steuern Zukunft: Innovativ. Interdisziplinär. Wissenschaftlich.**

Das breite Forschungsspektrum des Instituts bietet stets interessante Themen zur Auswahl, wobei ständig eine Vielzahl konstruktiv, experimentell und theoretisch orientierter Aufgabenstellungen vorliegt.

Studierende aller Studiengänge, in deren Prüfungsordnung eine studentische Arbeit im Bereich der Ingenieurwissenschaften vorgesehen ist, können diese am ISW anfertigen, insbesondere Studierende des Maschinenbaus, der Mechatronik, der Technischen Kybernetik und des Technologiemanagements.

Immer aktuelle Themen finden Sie unter:
**https://www.isw.uni-stuttgart.de/lehre/studentische-arbeiten/**

**Bachelor-, Studien-, Masterarbeiten**
**zu vergeben**

# PROZESSADAPTIVE REGELUNG ZUR GENAUIGKEITSSTEIGERUNG DER ROBOTERBASIERTEN FERTIGUNG

GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK) IM RAHMEN DES FÖRDERPROGRAMMS „ZUKUNFTSINVESTITIONEN IN DER FAHRZEUGINDUSTRIE“

**Der Wunsch nach mehr Individualität bei gleichzeitig immer kürzeren Produktzyklen erfordert flexible Produktionssysteme. Steigende Anforderungen bezüglich Qualität und Komplexität von Produkten bedingen darüber hinaus eine zunehmende Anzahl an Prozessen mit unterschiedlichsten Anforderungen, wie beispielsweise die Kombination von neuen additiven Fertigungsverfahren mit herkömmlichen subtraktiven. Da die Anforderungen der Prozesse stark differieren, ist zu untersuchen, inwiefern durch die flexible Adaption der Regelung eine Steigerung der Produktivität und Prozessqualität erzielt werden kann.**

Steigende Anforderungen an Produktqualität und -komplexität erfordern eine Reihe unterschiedlicher Produktionsverfahren. Die in der Folge notwendige Integration einer Vielzahl von spezialisierten Maschinen in die Fertigung führt zu hohen Einstiegshürden in Form von Investitionskosten, Platzbedarf und Ressourcen. Ein potentieller Lösungsansatz um diesen gesteigerten Flexibilitätsanforderungen gerecht zu werden besteht darin, herkömmliche Werkzeug- und Sondermaschinen durch Industrieroboter zu ersetzen. Eine ungelöste Herausforderung bei der Realisierung verschiedener Prozesse auf einer einzigen Maschine, stellt die flexible Adaption der Regelung dar. Die Möglichkeit, zwischen verschiedenen vordefinierten Reglermodi umzuschalten zu können, besteht im Stand der Technik, erfolgt aktuell jedoch durch manuelle Einrichtung bei der Inbetriebnahme einzelner Anlagen. Um flexibel auf veränderte Prozesse reagieren zu können, ist eine Adaption der Regelungsstrategie zur Laufzeit unerlässlich. Die Anforderungen der Verfahren (additive/subtraktive Fertigung, Handling) differieren stark, was meist Kompromisse bei der Reglerauslegung nach sich zieht. Ein Beispiel hierfür ist die maschinelle Bearbeitung komplexer Konturen, bei der mittels definierter Kräfte und Momente eine Steigerung der Bearbeitungsqualität erzielt werden kann. Infolgedessen scheint es für viele Prozesse zielführend von einer reinen Positionsregelung zu einer Kraftregelung überzugehen.

**Zielsetzung:**
Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer prozessadaptiven Regelung für die roboterbasierte Fertigung (vgl. **ABB. 1**). Es ist zu untersuchen, inwiefern durch die flexible Umschaltung der Regelung eine Steigerung der Produktivität und Prozessqualität realisiert werden kann.

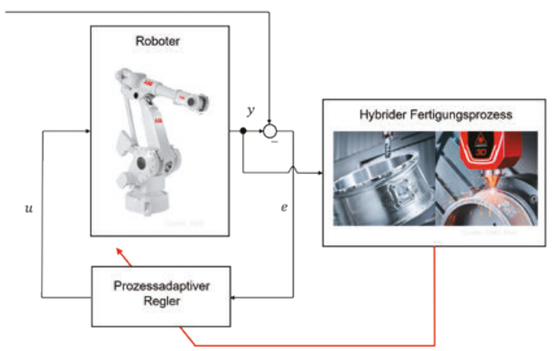



ABB.1: Adaptive Regelungsstruktur eines Roboters für flexible Fertigungsprozesse.

**Lösungsansatz:**
Durch Erstellung einer offenen Reglerarchitektur wird dem Anwender die Verwendung des für den aktuellen Prozess optimalen Reglers ermöglicht. Als Lösungskonzept wurde eine Datenbank mit vorgefertigten Reglerstrukturen (siehe **ABB. 2** links) entwickelt und die Möglichkeit geschaffen, diese inklusive definierter Parametersätze auf eine industrielle Steuerung (hier TwinCat) zu übertragen. Zum Aufzeigen des Potentials einer prozessadaptiven Regelung wurden vier verschiedene Reglerstrukturen (Positionsregler: Unabhängige Gelenksregelung, Kartesische Bahnregelung; Kraftregler: Paralleler und kaskadierter Kraftregler) implementiert und anhand eines Beispielprozesses simulativ verglichen. Zur Umschaltung zwischen den Reglern werden die in der

ABB.2: Reglerdatenbank (links) und exemplarisches Deployment eines Reglers auf eine Steuerung des Demonstrators (rechts).

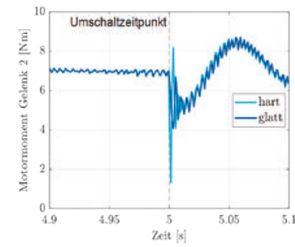



ABB.3: Motormoment in Gelenk 2 bei harter und geglätteter Umschaltung zwischen verschiedenen Reglern.

Regelung vorhandenen Integratoren zurückgesetzt. Zusätzlich werden die vorgegebenen Stellgrößen (Motormomente) in einer Übergangsphase geglättet, um die Aktoren zu schonen und Instabilitäten auszuschließen (vgl. **ABB. 3**). Anhand von Simulationen am digitalen Zwilling konnte die Reglerumschaltung erfolgreich validiert und deren Verbesserungspotential aufgezeigt werden.
Mittels des Konzepts des softwarebasierten Deployment wird die identische Struktur für die Validierung am digitalen Zwilling sowie die Übertragung auf die Steuerung erzielt. Hierbei wird ein modellbasierter Ansatz inklusive Codegenerierung verfolgt. Dadurch kann sowohl C++-Code für das Deployment auf die echtzeitfähige, virtualisierte Plattform als auch ein TcCOM-Objekt für Beckhoff-Steuerungen (siehe **ABB. 1** rechts) erzeugt werden. Durch diese Brownfield-Unterstützung ist die prinzipielle industrielle Übertragbarkeit gesichert.

**Ausblick:**
Zukünftig sollen die verschiedenen, bereits am digitalen Zwilling getesteten, Regelungsalgorithmen anhand des Demonstrators und verschiedener Fertigungsprozesse validiert werden. Die Ergebnisse sollen das Potential für die Produktion der Zukunft aufzeigen.

**Kontakt:**
Valentin Kamm, M.Sc.
valentin.kamm@isw.uni-stuttgart.de

# OPTIMIERUNG MEHRSTUFIGER PRODUKTIONSSYSTEME

**GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK) IM RAHMEN DES FÖRDERPROGRAMMS „ZUKUNFTSINVESTITIONEN IN DER FAHRZEUGINDUSTRIE“**

**Die Komplexität der Anwendung von starrer Hardware in flexible Software zu verlegen ist der Paradigmenwechsel mit dem sich das Forschungsprojekt SDM4FZI beschäftigt. Das Ziel ist eine flexible, wandlungsfähige und dynamische Produktion um Unsicherheit und Volatilität zu entgegnen. Dazu müssen starre Verbünde gelöst und auch die Produktions- und Fertigungsplanung zur Optimierung mehrstufiger Produktionssysteme flexibilisiert werden, welche in diesem Themengebiet des Projekts betrachtet wird.**

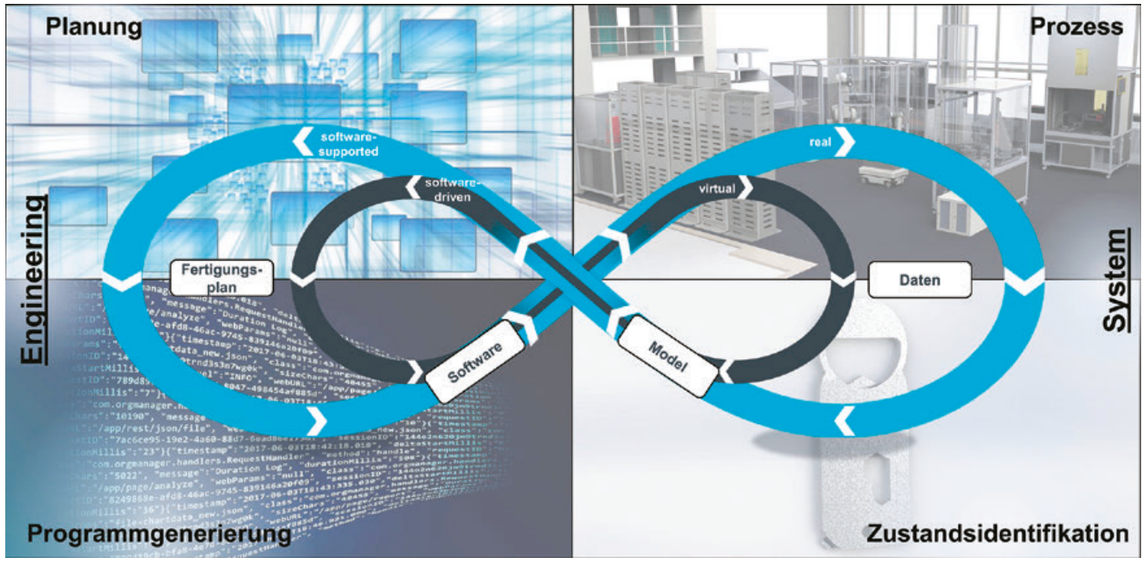



ABB.1: Konzept iterativer Planung.

Produktionssysteme stellen zumeist einen starren Verbund von Hard- und Software dar. Dabei werden benötigte Produktionsschritte und dazugehörige Produktionslinien, sowie ihre dazugehörigen Bearbeitungsprogramme, detailliert geplant und initial zum Start der Produktion optimiert. Spätere Abweichungen in der laufenden Produktion führen zu Problematiken auf dem Shopfloor. Volatilität und Individualität haben somit große Auswirkungen auf die Performance hinsichtlich Zeit, Kosten und Qualität dieser Produktionen. Betrachtet man des weiteren Fertigungen hoher Varianz, so sind Prozessverkettungen und Automatisierungslösungen unterrepräsentiert, wodurch sich Produktionsziele schwer abschätzen und somit schwer exakt planen lassen.

Während fähigkeitsbasierte Ansätze der Produktionsplanung vor allem auf die Ermittlung von Prozessvarianten durch entsprechende Definitionen von Features in variantenreichen Produktionen zielen, werden technologische bzw. qualitätsorientierte Eigenschaften nur geringfügig abgebildet.
In Bereichen des Zero-Defect Manufacturing stehen diese hingegen im Mittelpunkt, um z.B. Abweichungen über mehrere Prozesse zu detektieren und durch Parameteradaption in Folgeprozessen zu kompensieren. Dies ist durch benötige statistische Auswertungen jedoch nur in der Massenproduktion möglich.
Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie technologische und organisatorische Aspekte der Produktionsplanung und -optimierung zusammenhängend (z.B. in einem prozess-übergreifenden Framework) und unter Berücksichtigung des aktuellen Zustands der Produktion betrachtet werden können.
Dadurch sollen z.B. Use-Cases optimaler Planung ermöglicht werden, bei welchen im laufenden Produktionsprozess individueller Teile Abweichungen der Qualität oder geänderte Verfügbarkeit von Ressourcen berücksichtigt werden und zu Anpassungen von Produktionsplänen und Bearbeitungsprogrammen führen. Hierbei werden in iterativer Planung der Zustand des Produktionssystems und somit mögliche Abweichungen identifiziert, diese auf verfügbare Ressourcen projiziert. Daraus werden dannoptimale Abläufe und Bearbeitungsprogramme generiert und real oder virtuell ausgeführt (**ABB. 1**).
Hierfür wird ein Framework mit einer Software-orientierte n Planungsarchitektur (**ABB. 2**) konzipiert, welches auf fähigkeitsbasierten Ansätzen aufbaut, diese jedoch um weitere Modelle der Assets, einen dedizierten Service zur Planung erweitert und definierte Schnittstellen zur Integration eigener Services, z.B. für CAD oder CAM, bietet. Dies erfolgt auf einheitlicher Basis digitaler Abbilder von Produktspezifikationen, Werkstücken, Ressourcen, Produktionsplänen sowie Prozesswissen.
Eine erste Implementierung eines Proof-of Concept wurde in der „Stuttgarter Maschinenfabrik“ vorgenommen und ermöglicht die Ermittlung optimaler Prozessabläufe sowie

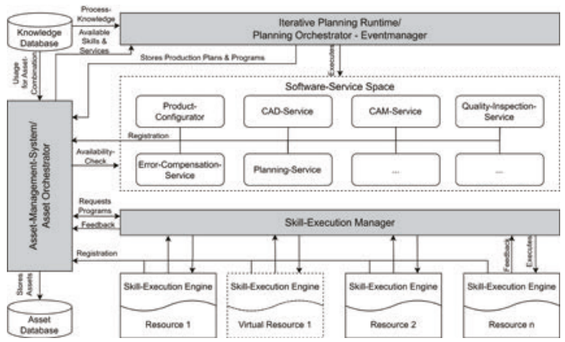



ABB.2: Software-orientierte Planungsarchitektur.

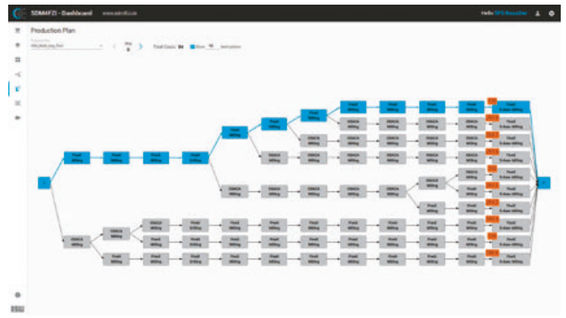


ABB.3: Planungsergebnisse einer einzelnen Planungsiteration.

Alternativen (**ABB. 3**) und dazugehöriger Bearbeitungsprogramme für einzelne Werkstücke. Durch den iterativen Ansatz werden Pläne nicht initial abschließend erstellt, sondern können laufend inklusive der dafür notwendigen Programme optimal generiert und adaptiert werden.
Damit lassen sich technische und organisatorische Anpassungen während der Produktion ermöglichen, welche zu einer Optimierung von Zeit, Kosten und Qualität beitragen.
Wesentliche weitere Forschungsaspekte betreffen die weitere Ausgestaltung des Frameworks und der benötigten Modelle zur weiteren Standardisierung, Abbildung und Auswertung von Messdaten, sowie die Untersuchung flexibler Kompensations- und Planungsalgorithmen zur effizienten Ermittlung optimaler Prozesse.

**Kontakt:**
David Dietrich, M.Sc.
david.dietrich@isw.uni-stuttgart.de

## DIGITALER ZWILLING ALS TEST- UND OPTIMIERUNGSPLATTFORM

**GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK) IM RAHMEN DES FÖRDERPROGRAMMS „ZUKUNFTSINVESTITIONEN IN DER FAHRZEUGINDUSTRIE“**

**Die Komplexität der Anwendung von starrer Hardware in flexible Software zu verlegen. Das ist der Paradigmenwechsel mit dem sich das Forschungsprojekt SDM4FZI beschäftigt. Das Ziel ist eine flexible, wandlungsfähige und dynamische Produktion um Unsicherheit und Volatilität zu entgegnen. Dabei spielt die Anwendung von digitalen Zwillingen eine wichtige Rolle, da diese die reale Produktion abbildet und erste Neukonfigurationen virtuell testet und optimiert.**

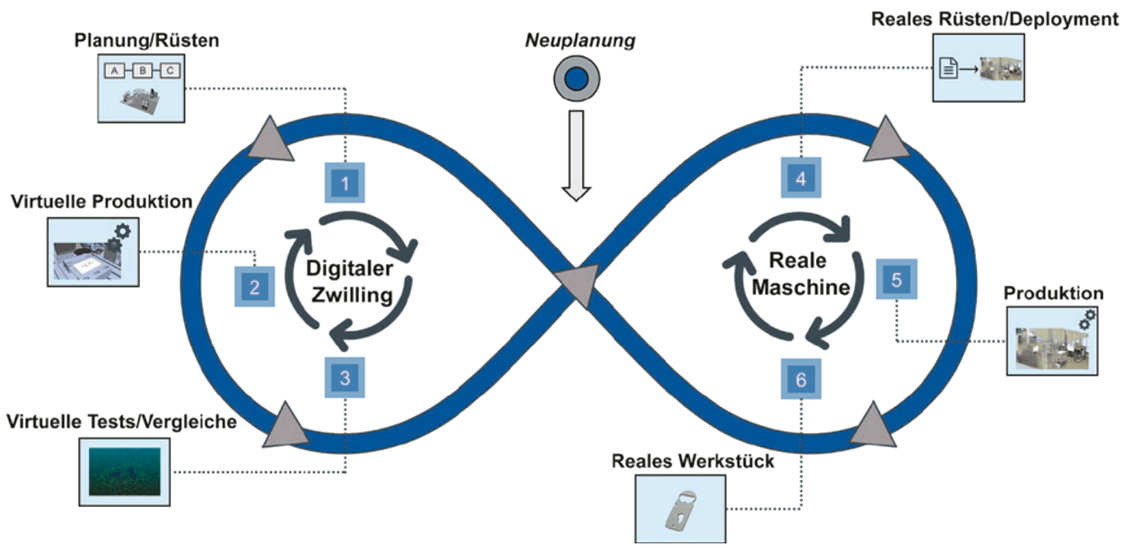



ABB.1: SDM-Loop des Digitalen Zwillings.

Die zunehmende Notwendigkeit einer flexiblen und wandlungsfähigen Produktion erfordert eine digitale Absicherung durch den Einsatz von digitalen Zwillingen. Diese digitalen Zwillinge können schon vor der realen Produktion Softwarekomponenten testen und Aussagen über die Qualität des zu fertigenden Produkts treffen, indem eine genaue Simulation des realen Verhaltens aus Basis einer realen Maschine durchführt. Zusätzlich ist es erforderlich, ein Qualitätsmodell im digitalen Zwilling zu implementieren, um die Identifikation und Bewertung von Qualitätsmerkmale zu ermöglichen.
Durchgeführt wird der Ansatz mithilfe vom SDM-Loop (s. **ABB. 1**), indem bei jeder Neuplanung automatisch im digitalen Zwilling gerüstet und virtuell produziert wird. Dabei ist es wichtig, dass der digitale Zwilling die reale Maschine so genau wie möglich widerspiegeln kann. Nachdem das Produkt virtuell gefertigt wurde, kann durch Qualitätsmodelle ein Abgleich zwischen Soll- und Ist-CAD erstellt werden. Dabei wird das Produkt so lange im Virtuellen optimiert, bis es eine ausreichende Qualitätstoleranz erreicht hat. Eine Möglichkeit der Optimierung ist bspw. der G-Code. Erst wenn die Qualität des Produkts ausreichend ist, werden die ganzen Softwarekomponenten eins zu eins auf die reale Maschine aufgesetzt. Ermöglicht wird der Ansatz durch Verwaltungsschalen, die alle Daten strukturieren und in jeder Phase des Lebenszyklus einer Maschine oder Produkts verfügbar machen.
Ein erstes Konzept wurde in der „Stuttgarter Maschinenfabrik“ umgesetzt. Dabei wurde die Software „virtuos“ von der ISG benutzt. Für eine präzise Simulation, wurde das Simulationsmodell durch die Integration eines virtuellen NC-Kerns erweitert. Dadurch können erste Softwaretests ohne den Einsatz von Hardwaremittel, wie einer realen Steuerung, ermöglicht werden. Durch die Verwendung einer Abtragssimulation (s. **ABB. 2/1**) kann ein digitales Produkt virtuell hergestellt werden. Um die Qualität des digitalen Produkts zu evaluieren, kann das Produkt als STL-Datei exportiert und anschließend mit dem Soll-CAD-Produkt verglichen und analysiert werden (s. **ABB. 2/2**), wodurch bereits frühzeitig mögliche Fehler im Produkt identifiziert werden können.
Zukünftig soll eine detaillierte Überprüfung der möglichen Fehler durchgeführt werden, mit dem Ziel, Fehler frühzeitig zu erkennen und zu korrigieren.

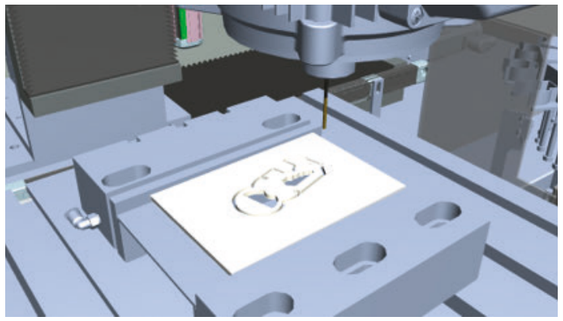


ABB.2: Abtragssimulation mit virtuos.

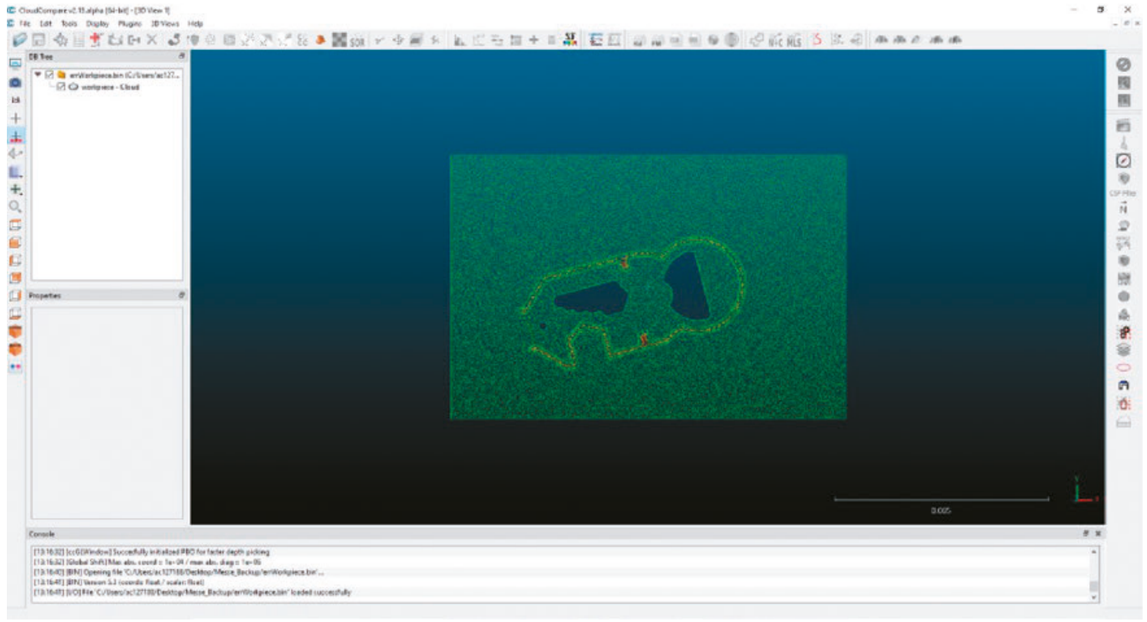


ABB.3: CAD-Vergleich mit CloudCompare.

**Kontakt:**
Shengjian Chen, M.Sc.
shengjian-patrick.chen@isw.uni-stuttgart.de

## KONVERGENTE NETZE UND VIRTUALISIERUNG

**GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK) IM RAHMEN DES FÖRDERPROGRAMMS „ZUKUNFTSINVESTITIONEN IN DER FAHRZEUGINDUSTRIE“**

**Die Komplexität der Anwendung von starrer Hardware in flexible Software zu verlegen ist der Paradigmenwechsel, mit dem sich das Forschungsprojekt SDM4FZI beschäftigt. Das Ziel ist eine flexible, wandlungsfähige und dynamische Produktion um Unsicherheit und Volatilität zu begegnen. Voraussetzung hierfür ist unter anderem ein konvergentes Netzwerk und der Einsatz von Methoden der Virtualisierung.**

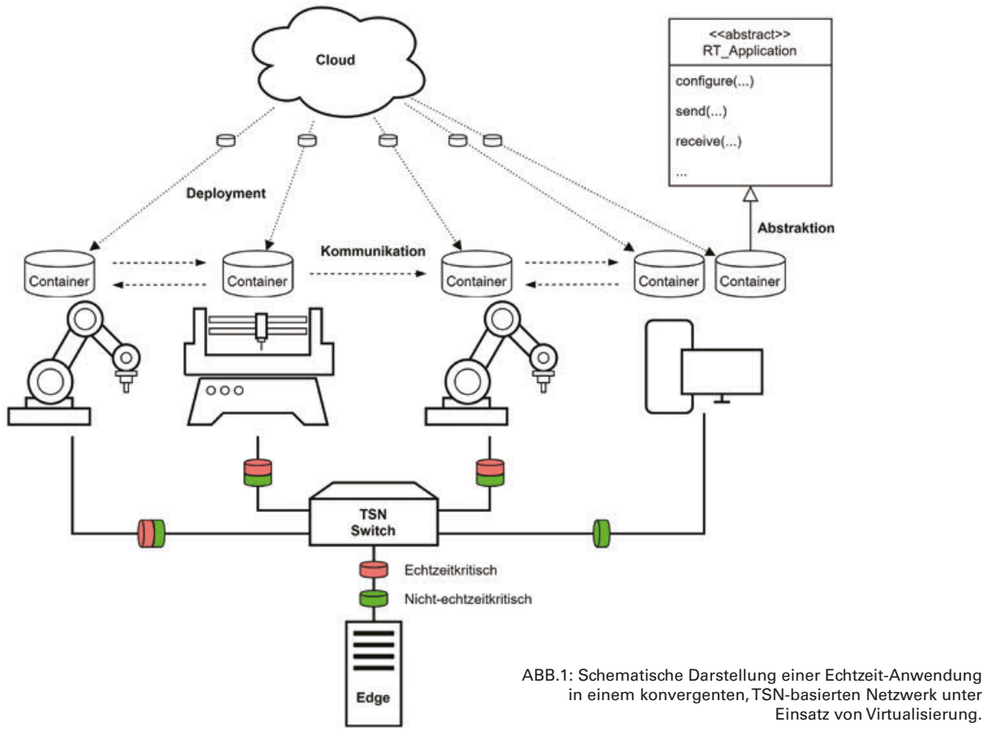



ABB.1: Schematische Darstellung einer Echtzeit-Anwendung in einem konvergenten, TSN-basierten Netzwerk unter Einsatz von Virtualisierung.

Damit flexibel auf volatile Anforderungen an die Produktion reagiert werden kann, ist es notwendig, dass Steuerungsprogramme und sonstige (Echtzeit-) Applikationen dynamisch deployt und ausgeführt werden können. Neben der technischen Möglichkeit, virtualisierte Applikationen auf im Netzwerk befindliche Endgeräte zu deployen, ist auch eine Zusammenführung der klassischen IT- und der OT-Kommunikation erforderlich. Forschungsinhalt ist die Realisierung eines konvergenten Netzes, in welchem Echtzeit-Applikationen (wie z.B. virtuelle SPS-Lösungen, NC-Steuerungen) zu zusammenhängenden verteilten Echtzeitanwendungen dynamisch deployt und orchestriert werden können.

Für die Umsetzung der sich ergebenden konvergenten Kommunikation wird Time-sensitive Networking (TSN) eingesetzt. TSN ist eine Menge an Substandards zur Erweiterung des herkömmlichen Ethernet-Standards IEEE 802.1 um deterministische Funktionen. Neben der kabelgebundenen Kommunikation gilt es zudem auch kabellose Technologien zu berücksichtigen, die in der Produktion beispielsweise für fahrerlose Transportsysteme (FTS) eingesetzt werden. Im Kontext von TSN sind hier insbesondere 5G und WiFi 6 die zu nennenden Schlüsseltechnologien. Ist zudem Kommunikation über weitere Entfernung erforderlich, kann Deterministic Networking (DetNet) verwendet werden. Dadurch kann eine deterministische Übertragung über geroutete Strecken erreicht werden.

Die unterschiedlichen Technologien bringen spezifische Anforderungen und Implementierungsdetails mit sich. Um diese Komplexität zu bewältigen, soll eine Abstraktion der Echtzeitkommunikation erreicht werden. Dadurch soll erreicht werden, dass die Kommunikation im Netzwerk als allokierbare Ressource betrachtet werden kann, ohne notwendige Kenntnisse über die verwendeten, darunterliegenden Technologien zu haben. Auf dieser Grundlage ist zudem die Abstraktion der Implementierung von Echtzeit-Applikationen möglich. Entwicklern werden beispielsweise vereinfachte Methoden für das Senden, Empfangen und zyklische Ausführen ihrer Anwendungslogik bereitgestellt, sowie eine Abstraktion der Ein- und Ausgangsdaten.

In Kombination mit der Verwendung von Virtualisierungstechnologien entsteht ein dynamisch orchestrierbares, konvergentes Netzwerk (**ABB. 1**).

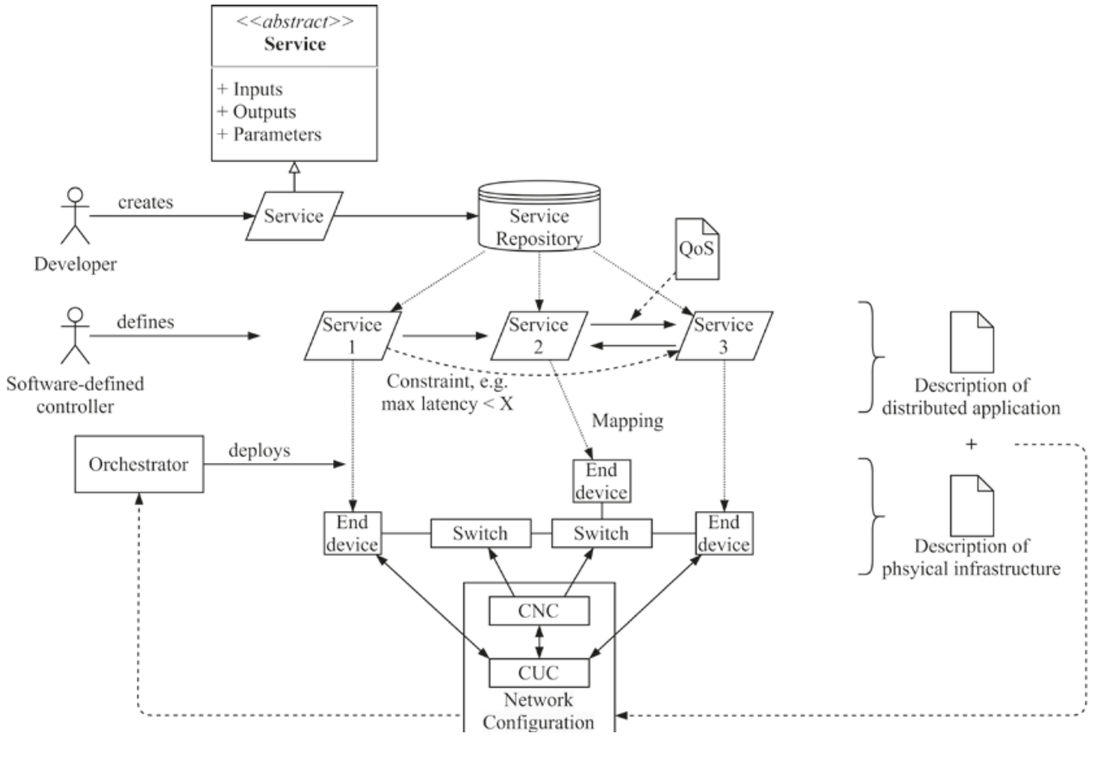



ABB.2: Dynamisches Deployment von abstrahierten Echtzeit-Applikationen und Konfiguration TSN-basierter Kommunikationsflüsse.

Für die Umsetzung dient ein, in einem weiteren Forschungsprojekt entwickeltes Framework für das Management und die Konfiguration von verteilten Echtzeitanwendungen in einem TSN-basierten Netzwerk, als Grundlage. Neben der Beschreibung der physischen Topologie, inklusive näherer Information der enthaltenen Komponenten, ist zudem eine Modellierung der Echtzeitanwendung erforderlich. Hierzu zählt die Abbildung der Datenströme sowie der Abhängigkeiten und Anforderungen der einzelnen Echtzeitapplikationen. Durch die kombinierte Betrachtung beider Beschreibungen wird es möglich, einzelne Echtzeitapplikationen physischen Endgeräten zuzuordnen, dynamisch die Kommunikationsflüsse untereinander zu konfigurieren und die Applikationen letztendlich zu deployen und auszuführen (**ABB. 2**).

**Kontakt:**
Stefan Oechsle, M.Sc.
stefan.oechsle@isw.uni-stuttgart.de

# SOFTWARE-DEFINED CAR (SofDCar)

## GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK)

**Das Projekt SofDCar beschäftigt sich mit den Herausforderungen immer komplexer werdender Systemarchitekturen in der Automobilindustrie durch Digitalisierung. Um diese Herausforderungen zu adressieren wird ein digitaler Zwilling als virtuelles Abbild der Entwicklungs- und Laufzeitdaten eines Fahrzeugs konzipiert und umgesetzt. Der digitale Zwilling soll dabei kontinuierlich Daten des Fahrzeugs erfassen und analysieren, und Anpassungen vornehmen können. Dies soll über den ganzen Lebenszyklus vom Entwicklung hin zum Betrieb des Fahrzeugs geschehen.**

Die Digitalisierung stellt die Automobilindustrie vor zwei große Herausforderungen. Einerseits verändern und wachsen die Ansprüche der Verbraucher, andererseits gibt es große technologische Veränderungen in der Mobilitätsindustrie. Digitale Zwillinge sind in der Automobilindustrie aktuell nur im Ansatz vorhanden und bieten noch wenig Mehrwert für ihre gesammelten Daten. Durch die Analyse der Daten und deren Verwaltung ergeben sich neue Wertschöpfungsketten inklusive Services von denen Konsumenten als auch Produzenten profitieren können.
Der digitale Zwilling als einer der Komponenten des Software-defined Car bietet die Basis für Services die dem Konsumenten erlebbar gemacht werden können und dem Produzenten als Analysemöglichkeit die bis auf die Flottenebene und Umgebung ausgebaut werden können. Der digitale Zwilling umfasst dabei die die Software-Ebene und Konfiguration des individuellen Fahrzeuges, die Sensordaten zur Wahrnehmung, Vorhersage und Planung und die über die Flotte in Echtzeit erfasste Umgebung. Die schon hohe Komplexität der Systeme und eingesetzten Softwarearchitekturen nimmt damit weiter zu, muss jedoch gleichzeitig beherrschbar bleiben.
Um diese Komplexität zu beherrschen, können Modellierungssprachen, ähnlich der UML oder SysML genutzt werden. Am ISW soll dabei eine CI-fähige Infrastruktur zur semantischen Integration heterogener Modelle des digitalen Zwillings entstehen. Die Infrastruktur ist bietet dabei die Möglichkeit die beteiligten Modellierungssprachen und Transformationen abzubilden und mittels Sprachschnittstellen über SCOLAR Sprachkomponenten zur weiteren automatischen Verarbeitung bereitzustellen. Damit können kompatible Modellierungssprachen mittels Sprachaggregationstechniken integriert und verifiziert werden.

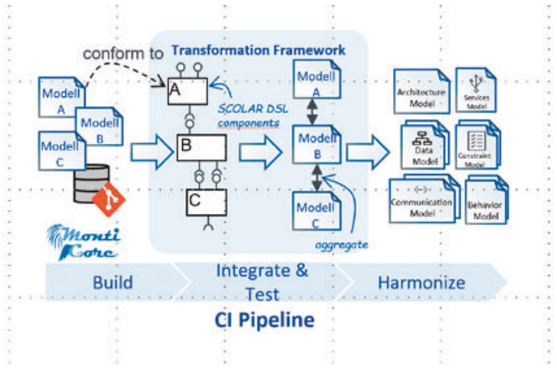



ABB.1: Das Integrationsframework zur semantischen Integration heterogener Modelle des digitalen Zwillings.

**Projektpartner:**

**Kontakt:**
Jérôme Pfeiffer, M.Sc.
jerome.pfeiffer@isw.uni-stuttgart.de





# SMART FACTORY DURCH DIGITALE ZWILLINGE IN DER FAHRZEUGINDUSTRIE (SFTwin)

## GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK)

**In diesem Forschungsprojekt wird die Umsetzung der Digitalisierung der Fertigung eines Automobilzulieferers mit Hilfe von digitalen Typenschildern und digitalen Zwillingen untersucht. Die Digitalisierung reicht hierbei von der Ablösung papierbasierter Prozesse über die Vernetzung von Anlagen und deren Integration in Simulations- und Planungssysteme bis hin zur Einbindung der Fachkräfte durch zielgruppenspezifische Schulungskonzepte.**

Die deutsche Automobilindustrie befindet sich seit einigen Jahren im Wandel: Waren früher Hubraum, PS und maximale Beschleunigungswerte gefragt, so sind heute emissionsfreie Mobilität, CO2-neutrale Produktion und die Ökobilanz eines Automobils die wichtigsten Werte bei der Werbung für neue Automobile. Diese Veränderungen sind einerseits auf ein Umdenken in der Bevölkerung, andererseits aber auch auf gesetzliche Vorgaben und Restriktionen zurückzuführen.
Durch eine vollständige Digitalisierung der produzierenden Unternehmen ist eine effizientere und nachhaltigere Wertschöpfung möglich, da beispielsweise papierbasierte Prozesse in der Fertigung intelligent digitalisiert und dadurch weitere Synergieeffekte generiert werden können.
Dieser Wandel betrifft nicht nur die Produktion selbst, sondern auch die Beschäftigten der produzierenden Unternehmen. Diese werden in den Veränderungsprozessen oft vernachlässigt. Für eine ganzheitliche digitale Transformation müssen auch sie eingebunden und geschult werden. Die Digitalisierung der Produktion soll durch die digitale Transformation papierbasierter Prozesse erreicht werden. Dazu werden Zustandsanalysen durchgeführt und entsprechende Lösungsansätze durch neuartige Daten-/Prozessmodellierungen angewendet. Diese bilden die Grundlage für den Einsatz von Verwaltungsschalen (engl.: Asset Administration Shells, kurz: AAS) und verschiedener Simulationsmodelle, die den Aufbau einer digitalen Fabrik ermöglichen und unter anderem für eine virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) eingesetzt werden können. Eine schematische Darstellung der anvisierten digitalen Fabrik mit den zu betrachtenden Themenfeldern ist in der Abbildung zu sehen. Um einen nachhaltigen digitalen Wandel sicher zu stellen wird parallel dazu wird das Fachpersonal durch zielgruppenspezifische Schulungskonzepte in das Themengebiet der Digitalen Fabrik integriert und für die zukünftige Arbeit im Industrie 4.0 Umfeld befähigt.

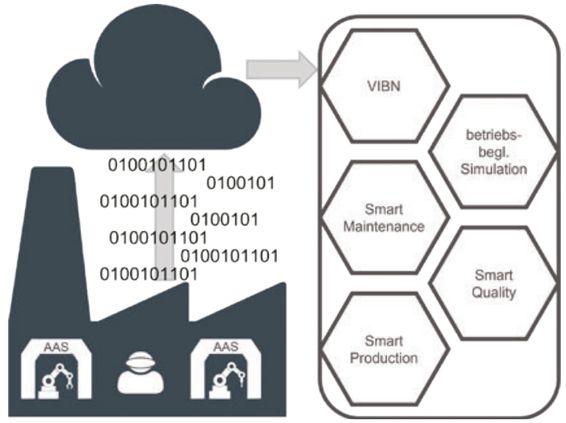



ABB.1: Schematische Darstellung einer digitalen Fabrik die mit ihren Komponenten und Eigenschaften die Produktion in “SFTwin“ verbessern sollen.

**Projektpartner:**

**Kontakt:**
Samed Ajdinović, M.Sc.
samed.ajdinovic@isw.uni-stuttgart.de

Shan Fur, M.Sc.
shan.fur@isw.uni-stuttgart.de

# FACHKRÄFTEMANGEL

Mit Ihrer Anzeigenschaltung in den Fachpublikationen helfen Sie dem akuten Fachkräftemangel in Deutschland entgegenzuwirken. Weitere Informationen und Publikationen finden Sie online.

**ALPHA Informationsgesellschaft mbH**
Finkenstraße 10
D–68623 Lampertheim
Tel.: 06206 939-0
magazin@alphapublic.de
www.alphapublic.de




## CO2-EINSPARUNG DURCH REIFEGRADSTEIGERUNG DER WERTSCHÖPFUNGSKETTE HYBRIDER HOCHLEISTUNGSBAUTEILE FÜR DEN FUNKTIONALEN LEICHTBAU (CO2-HyChain)

**GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK) IM RAHMEN DES TECHNOLOGIE-TRANSFERPROGRAMMS LEICHTBAU (TTP LB)**

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

**In der Automobilentwicklung wird dem funktionalen Leichtbau eine entscheidende Rolle für die effiziente Nutzung von Ressourcen und Energie zugerechnet. Das Rührreibverschweißen von Blechen unterschiedlicher Dicken und Werkstoffe zu sogenannten Tailor-Welded Blanks (TWB) bietet hier neue Gestaltungsfreiheiten und hohes Leichtbaupotenzial für die Automobilbranche. Der Prozess unterliegt jedoch hohen Anforderungen an die Anlagentechnik und die Prozessregelung, was im Rahmen dieses Verbundprojektes adressiert wird.**

Der Verkehr auf Deutschlands Straßen verursacht jährlich etwa 160 Mio. Tonnen CO2 und ist damit für etwa 20% des gesamten CO2-Ausstoßes der Bundesrepublik verantwortlich. Eine äußerst wirkungsvolle Maßnahme, den von PKWs verursachten CO2-Ausstoß zu reduzieren, besteht in der Reduktion des Fahrzeuggewichts durch funktionalen Leichtbau. Die Automobilindustrie ist bestrebt, hierzu hochfeste Aluminium Tailor Welded Blanks (TWB) und hybride Aluminium-Stahl Tailor Welded Coils (TWC) im Karosseriebau einzusetzen (**ABB. 2**). Die Möglichkeit zur Kombination unterschiedlicher Werkstoffe und Blechdicken durch den Einsatz von Rührreibschweißen (RRS) birgt großes Potenzial zur anwendungsspezifischen Optimierung von Leichtbaustrukturen.

Die mangelnde Verfügbarkeit entsprechender Anlagentechnik zur Herstellung von TWB/TWC stellt bislang die größte Hürde für einen industriellen Einsatz dar. Außerdem unterliegt der dazu eingesetzte RRS-Prozess (**ABB. 1**) hohen Anforderungen an die Prozessparameter (z.B. gleichmäßige Temperatur der Schweißnaht), was durch große Toleranzfelder der verwendeten Halbzeuge zusätzlich erschwert wird.

**Ziel:**

Übergeordnetes Ziel dieses Projektes ist, durch den Technologietransfer von Forschungseinrichtungen zu industriellen Herstellern, die bisher im Labormaßstab erforschten Lösungen, weiterzuentwickeln sowie die gesamte Wertschöpfungskette im Reifegrad zu steigern.

**Lösungsansatz:**

In der ersten von drei Projektspuren wird eine Portalanlage zur wirtschaftlichen, stückweisen Herstellung großformatiger hybrider Aluminium-Stahl TWBs entwickelt. Bisherige Rührreibschweißanlagen sind entweder nur für sehr spezifische Anwendungsfälle wie z.B. die Herstellung sehr langer Kranträger optimiert oder aber es handelt sich bei den Anlagen um Anpassungskonstruktionen von 5-Achs-Fräsmaschinen. Zur Herstellung von TWB ist jedoch prinzipiell eine 2,5D-Bearbeitung ausreichend. Die Bearbeitung benötigt dafür eine verhältnismäßig große Arbeitsfläche, wobei vom Fräsen signifikant abweichende Kraftkollektive erforderlich sind.

Das Ziel der zweiten Projektspur ist die Entwicklung, Inbetriebnahme und Validierung einer Durchlaufanlage für die quasi-kontinuierliche Herstellung von hybriden Aluminium-Stahl TWCs. Die fortlaufende Bewegung der Blechbänder stellt eine Herausforderung für die Einspannung und den Gegenhalter dar und erfordert neuartige Lösungskonzepte. Aufgrund der hohen Vorschubgeschwindigkeiten und der anspruchsvollen Aluminium-Stahl Schweißnaht bestehen hohe Anforderungen an die Steuerungs- und Regelungsstrategien der Anlage.

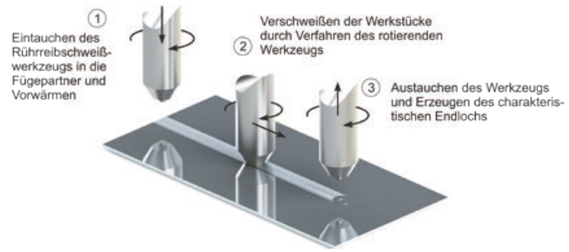



ABB.1: Die drei Phasen des Rührreibschweißens [Quelle: MPA Uni Stuttgart].

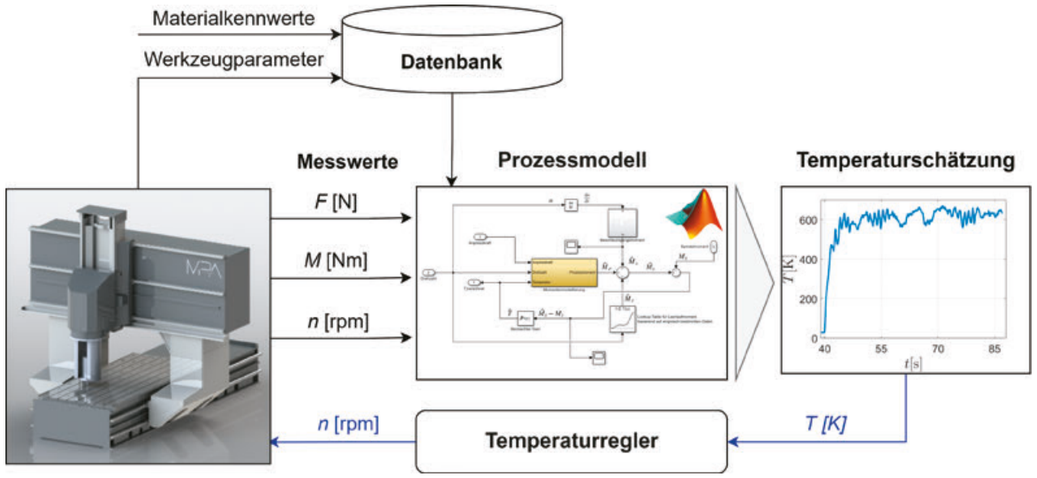



ABB.3: Prinzipbild zur sensorlosen Temperaturregelung mithilfe eines Prozessmodells.

In beiden Fällen wird das Werkzeug durch eine spezielle Anstellkinematik positioniert, deren kinematische Transformation steuerungstechnisch berücksichtigt werden muss. Um trotz der beschriebenen Herausforderungen einen robusten Schweißprozess mit bestmöglicher Qualität der Schweißnähte zu ermöglichen, wird weiterhin eine Prozessregelung entwickelt. Hierzu werden verschiedene Ansätze betrachtet – beispielsweise zur direkten, beobachterbasierten Regelung der Prozesstemperatur durch Variation der Drehzahl (**ABB. 3**), oder zur eher klassischeren Regelung der Anpresskraft bei konstanter Drehzahl. Robustheitsuntersuchungen sollen die Eignungen der unterschiedlichen Ansätze aufzeigen.

**Erwartete Ergebnisse:**

Es stehen Anlagen zur wirtschaftlichen Fertigung großformatiger TWB und quasi-kontinuierlich hergestellter TWC zur Verfügung. Dies beinhaltet aus steuerungstechnischer Sicht unter anderem die Implementierung einer neuartigen Maschinenkinematik. Weiterhin wird erwartet, dass die Schweißprozesse für TWB und TWC auf beiden Anlagen experimentell validiert sind und die Robustheit des Prozesses nachgewiesen wurde.

ABB.2: Umgeformtes Tailor Welded Blank aus Aluminium (außen) und Stahl (innen). [Bildquelle: MPA Uni Stuttgart].

**Assoziierte Partner:**

**Projektpartner:**

**Kontakt:**
Nico Helfesrieder, M.Sc.
nico.helfesrieder@isw.uni-stuttgart.de

## OFFENES, VERTEILTES, ECHTZEITFÄHIGES UND SICHERES BETRIEBSSYSTEM FÜR DIE PRODUKTION (FabOS)

**GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK)**

**FabOS bildet das IT-Backbone für die wandlungsfähige Automatisierung der Fabrik der Zukunft und die Basis für ein Ökosystem datengetriebener Dienste und KI-Anwendungen. Deutsche Unternehmen können von ihrem tiefen Domänenwissen und ihrer Erfahrung mit industriellen Produkten, komplexen und hochqualitativen Fertigungsprozessen sowie wandlungsfähigen und stark vernetzten Produktionssystemen (Internet der Dinge, Industrie 4.0) profitieren. Diese starke Industriekompetenz ist essentiell, um KI-Lösungen für industrielle Anwendungen zu entwickeln und damit die KI-Technologie über den Stand der Technik hinaus voranzutreiben.**

KI-Anwendungen im Kontext von Industrie 4.0 benötigen einen kohärenten Zugriff auf Daten, Sensoren, Maschinen und Prozesse - zuverlässig und in Echtzeit - um eine intelligente Automatisierung in der Fabrik der Zukunft zu ermöglichen. Ziel des Projekts FabOS ist es daher, ein Technologiekonzept und eine Plattform in Form eines Betriebssystems zu entwerfen, das den IT-Backbone für die wandlungsfähige und flexible Automatisierung der Fabrik der Zukunft und die Basis für ein Ökosystem datengetriebener Dienste für KI bildet. Hybride Cloud-Plattformen und IoT-Anwendungen sind Kernelemente cyber-physischer Architekturen und werden die Basis für zukünftige Produktionslösungen bilden. FabOS ist eine Plattform, die ähnlich wie ein Betriebssystem einzelne, unabhängige und aufeinander abgestimmte Komponenten bereitstellt, um Maschinen, Infrastruktur und Dienste miteinander zu verbinden. Diese Plattform ist in **ABB. 1** dargestellt. Die Teilprojekte der 26 Partner decken verschiedene Teilaspekte dieser Plattform ab. Das Teilprojekt des ISW „Echtzeitfähige Komponenten, deren Ausführung und Kopplung zur OT-Integration und Simulation in FabOS“ fokussiert sich insbesondere auf die Echtzeitfähigkeit der KI-Anwendungen, sowohl im Bereich der Ausführung der verschiedenen FabOS-Komponenten, als auch in der Simulation der physikalischen Systeme. Echtzeitfähigkeit ist ein wichtiger Aspekt von Steuerungssystemen in der Produktion. In der Steuerungstechnik bedeutet Echtzeitfähigkeit zum einen zeitlichen Determinismus sowie kurze (< 1 Millisekunde) und garantierte Zykluszeiten bei der Ausführung von Algorithmen. Sie betrifft sowohl die Architektur und Kommunikation als auch die Komponenten selbst, die die auszuführenden Algorithmen enthalten.

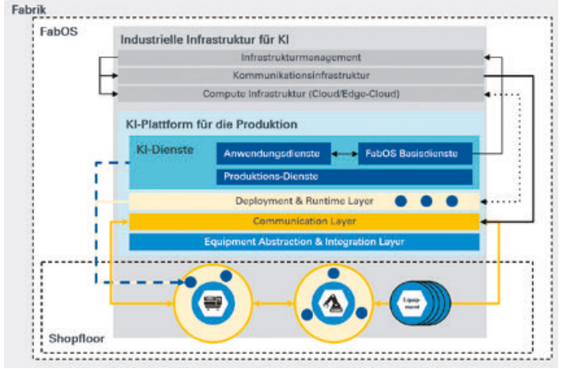



ABB.1: FabOS-Struktur Konzept.

KI-Anwendungen werden durch die Kombination von vordefinierten Komponenten entstehen. Eine Modularisierung (inkl. Virtualisierung oder Containerisierung) der Komponenten ist hier direkt als Lösungsmethode vorgesehen.

**Kontakt:**
Timo König, M.Sc.
timo.koenig@isw.uni-stuttgart.de





## ENTWICKLUNG EINER FLIESSKOMMAUNTERSTÜTZUNG FÜR CODED PROCESSING IN KOMPLEXEN SICHERHEITSALGORITHMEN (SafeFloat)

**GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK)**

**Sicherheitssteuerungen sind in vielen Anwendungsfelder vorgeschrieben um die Gefährdung des Menschen zu reduzieren. Stand der Technik ist, dass sicherheitskritische Systeme zufällige Hardwarefehler diagnostizieren und sicher behandeln müssen. Mit Softwaretechnologien wie dem Software Coded Processing (SCP) können zufällige Hardwarefehler bei Ganzzahlberechnungen auch auf Standardhardware diagnostiziert werden. Komplexere Sicherheitsfunktionen erfordern allerdings die Diagnose von Hardwarefehlern beim Rechnen mit Fließkommazahlen. In Kooperation zwischen der Silistra Systems GmbH und dem ISW werden die dargestellten Nachteile und Einschränkungen des Stands der Technik überwunden und erstmals eine Unterstützung von Fließkommazahlen in SCP integriert.**

Umwelteinflüsse wie Temperaturschwankungen, Vibrationen und Strahlung beeinflussen das Verhalten von Hardware und können sich z.B. als sporadische Bitflips in RAM und Prozessor, oder auch permanent unterbrochene Leitungen als zufällige Hardwarefehler manifestieren. Auch wenn die Auftrittswahrscheinlichkeit gering ist, wird in sicherheitskritischen Systemen eine Diagnose solcher Umwelteinflüsse gefordert. Zur Diagnose der zufälligen Hardwarefehler während des Betriebs des sicherheitskritischen Systems wird in vielen Fällen komplexe redundante Hardware oder Spezialhardware verwendet. Statt der Spezialhardware können aber auch softwarebasierte Ansätze verwendet werden. Dabei wird eine Redundanz auf Softwareebene erzeugt. Diese Redundanz wird typischerweise durch eine Toolchain automatisch erzeugt.
Mit dem Trend zu immer komplexeren Systemen werden auch sicherheitskritische Systeme komplexer. Diese komplexen Sicherheitsfunktionen erfordern die Diagnose von Hardwarefehlern beim Rechnen mit Fließkommazahlen. Die alleinige Unterstützung von Ganzzahlarithmetik durch bisherige Softwarelösungen ist somit nicht mehr ausreichend.
Die fehlende Fließkommaunterstützung soll durch die Identifikation und Entwicklung einer geeigneten Methodik begegnet werden. Dabei sollen Metriken wie der Performanceeinfluss und die Diagnosefähigkeit zum Einsatz kommen. Darauf aufbauend soll eine prototypische Integration in die automatisierte Toolchain zur Erzeugung der Redundanz erfolgen.

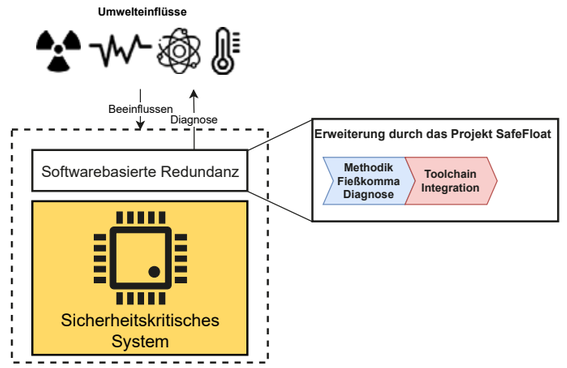



ABB.1: Erweiterung der softwarebasierten Redundanz.

**Projektpartner:**

**Kontakt:**
Marc Fischer, M.Sc.
marc.fischer@isw.uni-stuttgart.de

# ENTWICKLUNG EINES EXPERTENSYSTEMS FÜR EINE INFORMATIONSTECHNISCHE AUTOMATISIERUNG DER ERSTELLUNG VON OPC UA TESTFÄLLEN UND -SKRIPTEN IN INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS ANWENDUNGEN

**GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK)**

**In diesem Forschungsprojekt wird eine Automatisierung der bislang manuellen Testfallerstellung für OPC UA Companion Specifications angestrebt. Die Testfälle sind ein wichtiges Werkzeug, um Interoperabilität zwischen OPC UA Schnittstellenumsetzungen verschiedener Hersteller zu erreichen. Das aktuelle manuelle Vorgehen in der Erstellung hat maßgebliche Schwächen, vor Allem im Zeit- und Arbeitsaufwand der beteiligten Personen und der Anfälligkeit für Fehler, z.B. Übertragungsfehler. Dazu werden bestehende Companion Specifications und Testfälle sowie die jeweiligen Vorlagen analysiert und die Inhalte verknüpft. Diese Verknüpfung wird für eine automatische Erstellung der Testfälle genutzt.**

Die Maschinenkommunikation mit OPC UA ist in der Industrie angekommen und nimmt immer mehr zu. Damit der Datenaustausch verschiedener Komponenten reibungslos funktioniert, muss jede Komponente den gleichen Kommunikationsstandards entsprechen. Eine akkreditierte Zertifizierung der einzelnen Komponenten kann diese Entsprechung sicherstellen und damit teure Aufwände in der Inbetriebnahme verringern. In Companion Specifications können die zu übertragenden Daten für spezielle Anwendungsfälle oder Branchen festgelegt werden. Für Interoperabilität müssen diese Daten korrekt anhand der Spezifikation abgebildet sein – auch das kann mit Testfällen überprüft und somit sichergestellt werden. Aktuell werden diese Testfälle durch die Arbeitsgruppen, die auch die Companion Specifications entwickeln, erstellt. Die dazu notwendige Nennung was getestet werden soll und welche Ergebnisse erwartet werden, bedeutet einen hohen manuellen Aufwand. Ein zweites Mal entstehen Aufwände, wenn diese abstrakten Testfälle in Testskripte umgesetzt werden, also eine direkt nutzbare Implementierung der Testfälle. Dabei sind viele Testfälle monoton – für jedes Element in der Companion Specification wird beispeilsweise nach dem selben Schema die Prüfung durchgeführt, dass ein Produkt das Element genau entsprechend der Spezifikation umgesetzt hat (keine Schreibfehler im Namen, alle benötigten Datenfelder sind vorhanden etc.). Bei solchen monotonen Tätigkeiten kommen auch häufig Fehler vor, beispielsweise wenn Inhalte der Testfälle oder -Skripte kopiert und angepasst werden.

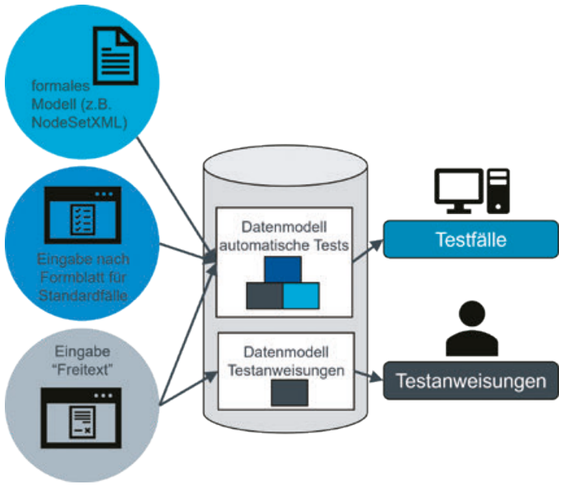



ABB.1: Aus formalem Modell, Formblatt und freier Eingabe werden Testfälle und Testanweisungen erstellt.

Für eine automatische Erstellung der Testfälle und Testskripte aus den Companion Specifications müssen die Zusammenhänge zwischen den jeweiligen Elementen ergründet werden. Diese Analyse findet im Forschungsprojekt manuell statt. Die Ergebnisse werden in einer Form aufbereitet, die es erlaubt, die Zusammenhänge in einem Softwaretool zu nutzen. Diese Software wird aus den standardisierten Dokumenten der Companion Specifications die für die Testfälle relevanten Inhalte finden, z.B. aus dem sogenannten NodeSetXML, das die spezifizierte Datendarstellung in maschinenlesbarer Form enthält. Für Informationen, die darüber hinausgehen, allen voran das Verhalten des Datenmodells, werden die Spezifikations-Ersteller Eingabemöglichkeiten erhalten – für häufig auftretende Fälle mit Formblättern, für Spezialfälle eine freie Eingabemöglichkeit. Aus diesen Eingangsdaten können dann Testfälle für eine automatische Prüfung als Programmcode erstellt und Testanweisungen für eine manuelle Prüfung erstellt werden.

Ziel des Projektes ist es, eine generische Automatisierung der Testfallerstellung für eine Vielzahl von verschiedenen Companion Specifications bereitzustellen. Damit soll sich die Erstellungszeit von OPC UA Testfällen für Standardisierungsgruppen von mehreren Wochen oder Monaten auf wenige Minuten oder Stunden verringern, in ähnlicher Weise für die Erstellung von Testskripten. Zusätzlich wird angestrebt, dass menschliche Fehler in einer monotonen Tätigkeit durch die Automatisierung vermieden werden.

Projektpartner ist das Ingenieurbüro Allmendinger, von der OPC Foundation akkreditierte Zertifizierungsstelle für OPC UA mit langjähriger Expertise in der Erstellung von OPC UA Testfällen und Testskripten.

**Kontakt:**
Tonja Heinemann, M.Sc.
tonja.heinemann@isw.uni-stuttgart.de

**Projektpartner:**

Ingenieurbüro Allmendinger
software- and system-development

## STUTTGARTER INNOVATIONSTAGE

**TRENDS UND INNOVATIONEN RUND UM DAS THEMA STEUERUNGSTECHNIK UND DIGITALISIERUNG**

Die hohe Skalierbarkeit und der Ressourcenreichtum von Cloud-Plattformen sollen auch für die Steuerungstechnik nutzbar gemacht werden. Dieser Gedanke war 2017 Grundlage der ersten Veranstaltung „Stuttgarter Innovationstage – Steuerungstechnik aus der Cloud". Inzwischen wird die Veranstaltung jährlich durchgeführt und informiert über die aktuellen Trends und Innovationen rund um das Thema Steuerungstechnik und Digitalisierung.

Weitere Informationen zur nächsten Veranstaltung finden Sie unter:

**www.stuttgarter-innovationstage.de**

ORGANISATION ISW VERANSTALTER FISW

# INTELLIGENTE LASERBEARBEITUNG: GALVANOMETER-SCANNER IN KOMBINATION MIT EINER MEHRACHSIGEN WERKZEUGMASCHINE (IntelliLab)

**GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK)**

**In diesem Forschungsprojekt werden Bahnplanungsmethoden für die Ansteuerung von Galvanometerscannern in redundanten Achsverbünden entwickelt. Jene ermöglichen es dann, dass der Galvanometerscanner parallel zu einem weiteren xy-Verbund bewegt wird, um so die Bearbeitungsfläche zu erweitern.**

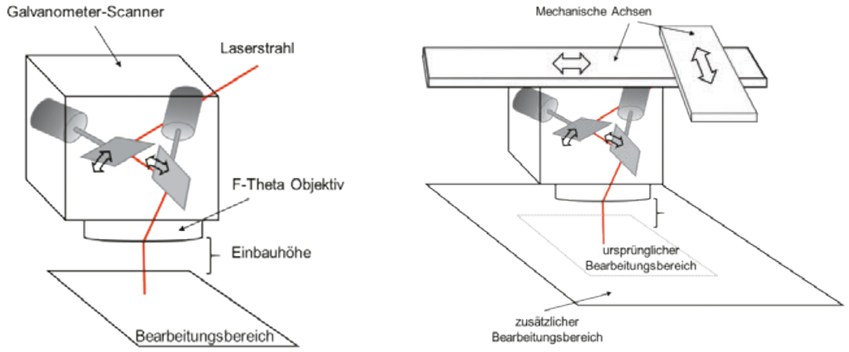



ABB.1: Links dargestellt ist eine Schematische Abbildung eines Galvanometerscanners mit seinen zwei Spiegeln, welche den einfallenden Laserstrahl in xy-Richtung ablenken. Rechts dargestellt ist, wie der gestrichelt dargestellte „ursprüngliche Bearbeitungsbereich" des Galvanometerscanners erweitert werden kann, indem der Galvanometerscanner auf einem mechanischem xy Achssystem montiert wird.

**Hintergrund:**
Mit den steigenden Fähigkeiten von Laserstrahlquellen beziehungsweise deren zunehmende Zugänglichkeit, wächst auch das Portfolio an Laserstrahlanwendungen. Unabhängig von der jeweiligen Anwendung ist es im Kontext der Wirtschaftlichkeit von Interesse, Prozesse möglichst schnell ablaufen zu lassen. Hier bieten sogenannte Galvanometerscanner (siehe **ABB. 1**) eine Möglichkeit, den einfallenden Laserstrahl über zwei bewegte Spiegel in der xy-Ebene abzulenken. Aufgrund der geringen Massenträgheit des Spiegelsystems können sehr hohe Dynamiken erreicht werden, wodurch der Laser in der Ebene mit Geschwindigkeiten von bis zu 10 m/s bewegt werden kann. Je nach Optik, welche nachgelagert an den Scanner angeschlossen ist, ergibt sich immer ein begrenztes Schreibfeld (z.B. 10 x 10 cm). Durch die Wahl einer anderen Optik lässt sich dies zwar vergrößern, hierdurch vergrößert sich aber auch der Strahldurchmesser auf der Auftrittsoberfläche. Jener muss aber prozessbedingt immer unter einem Maximalwert liegen. Um die Schreibfläche unter Beibehalt der hohen Dynamik des Galvanometerscanner und des Strahldurchmessers zu erweitern, wird dieser auf eine weitere xy-Kinematik platziert (siehe **ABB. 1**). Entsprechend entsteht ein System mit redundanten xy-Achsen. Das größere xy-System ist aufgrund der größeren Masse vergleichsweise wenig dynamisch. Im Zusammenspiel der beiden Systeme kann der Scanner dann kontinuierlich oder diskontinuierlich im größeren xy-System bewegt werden, um die Bearbeitungsfläche zu erweitern.
Im Stand der Technik und der Forschung gibt es unterschiedliche Ansätze, wie die vom Laser abzufahrende Sollbahn auf die zwei Systeme aufgeteilt werden kann. Im einfachsten Fall wird der Galvanometerscanner immer schrittweise bewegt, bis alle Schreibaufgaben im aktuellen Schreibfeld abgearbeitet sind (siehe **ABB. 2**). Dies hat den Nachteil, dass die dem





System überlagerten Fehler und Toleranzen an den Nahtstellen zwischen den Feldern sichtbar werden (siehe **ABB. 2)**. Durch eine kontinuierliche Bewegung von beiden Achssystem können solche Fehler vermieden und die Produktivität des jeweiligen Laserprozesses gesteigert werden. Die Aufteilung der Sollbahn auf die zwei Systeme ist nun aber nicht mehr trivial.
**Problemstellung:**
Bei der Aufteilung der Bahn gibt es folgende Probleme:
Ersten, die unterschiedlichen geometrischen Randbedingungen der Systeme müssen stets berücksichtigt werden. Das heißt, es kann z.B. nie gefordert werden, dass der Galvanometerscanner den Laserstrahl weiter ablenkt, als es das Schreibfeld erlaubt.
Zweitens, idealerweise werden bei der Aufteilung die unterschiedlichen Dynamiken der beiden Systeme berücksichtigt, damit diese möglichst schnell arbeiten können.
Drittens, im Stand der Technik gibt es mehrere Verfahren, welche die Bahnaufteilung offline durchführen. Das hat zur Konsequenz, dass z.B. im jeweiligen Prozess gemessene Daten nicht verwendet werden können, um online die Bahnaufteilung anzupassen. Deswegen erfolgt die Bahnaufteilung idealerweise online.
Viertens, aufgrund der mit dem Galvanometerscanner erreichbaren hohen Dynamik, müssen Bahnsollwerte im 10 µs Takt berechnet bzw. vorhanden sein. Zusätzlich erfordern viele Prozesse, dass die Laserquelle während einer Teilbewegung mehrfach an- bzw. ausgeschaltet wird. Entsprechend werden hier oft Sollwertsignale im 1 µs Takt gefordert. In beiden Fällen ist es mit industriellen Steuerungen, welche meist Zykluszeiten zwischen 100 und 1000 µs aufweisen, nicht ohne Weiteres möglich, die gewünschten Sollwertsignale zu erzeugen.
Fünftens, zahlreiche Prozesse erfordern es, dass die Bahngeschwindigkeit bzw. der Energieeintrag pro Zeit und Fläche konstant ist. Diese ist bei der Bahnaufteilung als wichtige Randbedingung zu berücksichtigen.
Sechstens, um eine möglichst universelle Lösung zu etablieren, ist es notwendig, auf industriell etablierte Feldbusse zu setzten (z.B. EtherCAT), damit das Steuerungskonzept unter industriellen Echtzeitanforderungen in übergeordnete Systeme integriert werden kann.

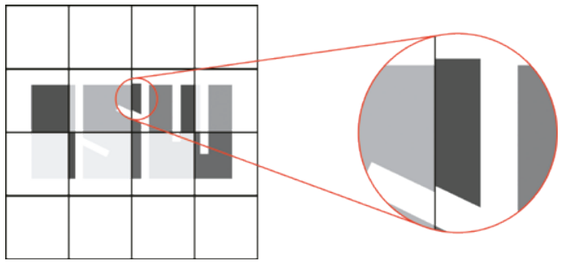


ABB.2: Links dargestellt ist wie, der durch eine redundante xy-Kinematik erweiterte Schreibbereich in Galvanometerscanner-Schreibbereiche eingeteilt werden kann. Dabei wird jeder Bereich sequenziell angefahren und der Scanner während der Bearbeitung statisch positioniert. Rechts angedeutet, ist welche Versatzfehler zwischen den Schreibfedern auftreten können.

**Ziele:**
Das Gesamtziel des zweijährigen Projekts ist es, die im Stand der Technik und im Stand der Forschung vorhanden Methoden zu untersuchen. Basierend auf jenen Ergebnissen ist dann eine neue Lösung zu konzeptionieren, welche die oben beschriebenen Probleme löst. Anschließend wird diese an einer realen Anlage implementiert und validiert.

**Projektpartner:**

**Kontakt:**
Daniel Kurth, M.Sc.
daniel.kurth@isw.uni-stuttgart.de

Colin Reiff, M.Sc.
colin.reiff@isw.uni-stuttgart.de

# ENTWICKLUNG EINES NEUARTIGEN WERKZEUGS UND ZUGEHÖRIGE METHODEN FÜR DIE NUTZUNG VON 3D SIMULATION IN DER ANFORDERUNGSPHASE VON MASCHINEN UND ANLAGEN SOWIE DEREN ÜBERFÜHRUNG IN DIE ENTWICKLUNG (R2D2-Twin)

**GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK)**

**Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines neuen Werkzeugs und zugehöriger Methoden für den Einsatz von 3D-Simulation in der Anforderungsphase und die Übertragung dieser 3D-Simulation in die Maschinen- oder Anlagenentwicklung: Requirement-to-Development Digital Twin (R2D2-Twin). Mit R2D2-Twin soll die Kommunikation zwischen Kunde und Maschinen-/Anlagenhersteller in der Anforderungsphase durch eine werkzeuggestützte Erstellung des Lastenheftes und eine sofortige Visualisierung der aktuellen Version in einem neuen Maßstab ermöglicht werden und sich von der konventionellen, zeitaufwändigen Anforderungserstellung abheben.**

**Ausgangssituation**

Das derzeitige Vorgehen im Rahmen der Anforderungs- und Konzeptphase ist der bilaterale Austausch zwischen dem Kunden (produzierendes KMU) und dem Anlagenhersteller (bzw. Maschinenhersteller), um eine individuelle Lösung für den Kunden zu finden. Stand der Technik ist hier der Einsatz von Dokumentationssoftware wie PowerPoint, Excel oder Word und/oder die Verwendung von Modellierungssprachen wie UML oder SysML. Beide Seiten müssen viel Transferleistung erbringen: Der Anlagenbauer kennt aus Erfahrung die Grenzen des technisch Machbaren, muss diese aber dem Kunden verständlich erklären und in entsprechende Dokumente umsetzen. Der Kunde kennt alle – auch impliziten – Anforderungen an die Lösung und muss diese möglichst korrekt und vollständig an den Anlagenbauer weitergeben. Nachträgliche Änderungen aufgrund technischer Grenzen oder Missverständnissen führen zu aufwändigen Iterationen zwischen beiden Parteien – bis in die Betriebsphase der Produktion hinein – und verursachen hohen Zeit- und Kostenaufwand. Die weitestgehende Vermeidung von Fehlern in der Anforderungsphase ist ein wesentlicher Kostenfaktor und nicht zuletzt ein Wettbewerbsvorteil, wenn die Qualität, der Zeitplan und die Kosten der gelieferten Anlage eingehalten werden können.

**Intelligentes Assistenzsystem**

Mit Hilfe von R2D2-Twin soll die Kommunikation zwischen Kunde und Maschinen-/Anlagenhersteller in der Anforderungsphase durch eine werkzeuggestützte Erstellung des Lastenheftes und eine sofortige Visualisierung der aktuellen Version in einem neuen Umfang ermöglicht werden und sich von der konventionellen, zeitaufwändigen Anforderungserstellung abheben. Die Werkzeugunterstützung durch R2D2-Twin kann als intelligentes Assistenzsystem verstanden werden, das folgende Funktionen zum Ziel hat:

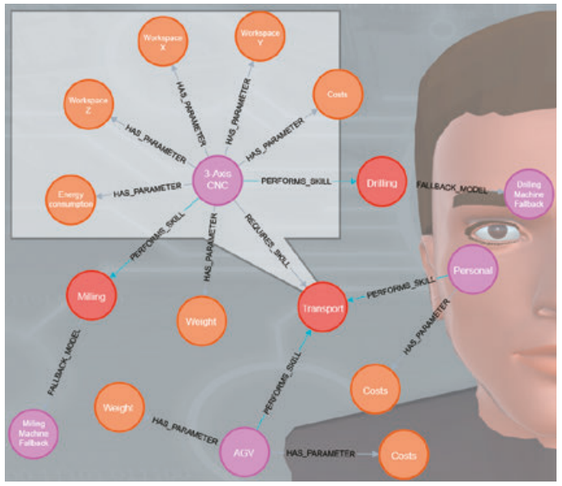



ABB.1: Intelligentes Assistenzsystem gesteuert durch ein neuronales Netz aus Anlagen- und Maschinendaten.



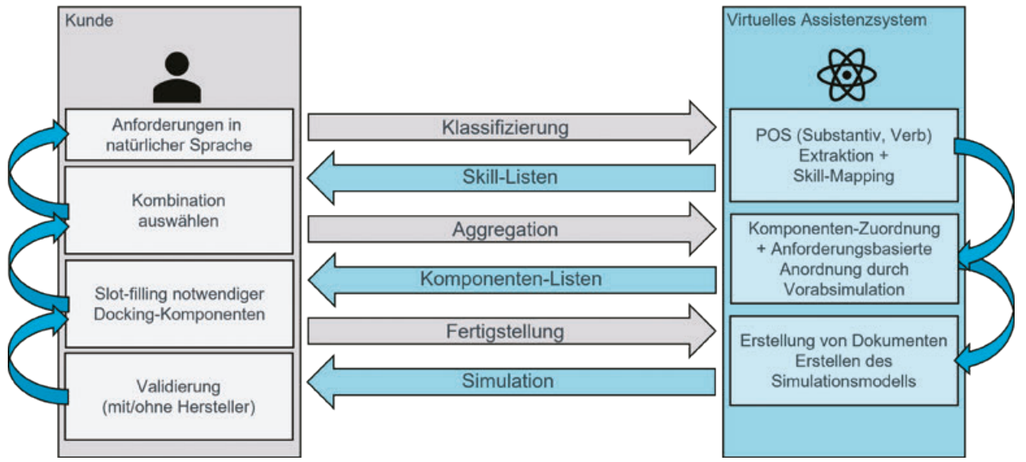



ABB.2: Interaktionsablauf zwischen Kunde und Assistenzsystem.

1. Wissen über die Produkte des Herstellers vorzuhalten und zur Verfügung zu stellen.
2. Alle Anforderungen automatisiert auf Vollständigkeit, Widerspruchsfreiheit und Realisierbarkeit zu prüfen
3. Die Anforderungen in eine verständliche und anschauliche Form in Form von 3D-Simulationsmodellen zu übersetzen.
4. Varianten vorhandener Simulationsmodelle zu generieren, um sie den Betrachtern, Kunde und Hersteller, zur Diskussion und Anforderungsreflexion zur Verfügung zu stellen.

Durch den Informationstransfer in die Konstruktionsphase wird das neue R2D2-Modell der Maschine oder Anlage zu einem „dynamischen Lastenheft", das den Lebenszyklus von der Anforderungsphase über die Konstruktionsphase bis hin zur virtuellen Inbetriebnahme ermöglicht.

**Lösungsweg**

In einem ersten Schritt soll eine neuartige Möglichkeit geschaffen werden, Kundenanforderungen als Randbedingungen in der Simulationsgenerierung zu verwenden. Der innovative Lösungsansatz besteht in der Kopplung von formal verarbeitbaren Anforderungen und einer Menge von parametrisierten Simulationsmodellen.

Ein konkretes Beispiel ist die Kundenanforderung „Transport von Stückgütern". Hier werden zunächst alle Komponentenmodelle, die den Transport von Stückgütern ermöglichen, eingeschränkt (durch Parametrisierung/Kennzeichnung algorithmisch auswertbar) und z.B. ein Simulationsmodell eines Materialförderers inklusive Simulationsverhalten und 3D-Visualisierung dem Baukasten hinzugefügt. Hat der Kunde zusätzlich (ggf. auch nachträglich) die Transportlänge definiert, wird das Simulationsmodell des Materialförderers im Baukasten entsprechend (um-)parametriert.

Im Projekt wird daher eine Modellierungssprache für die Anforderungsdefinition des Kunden entwickelt und als Modul in das Simulationswerkzeug des Industriepartners integriert. Dies erfolgt in zwei Schritten:

1. **Anforderungsklassifizierung:** Part-of-Speech (POS)-Tagging dient zur Vorverarbeitung der Eingabe (Extraktion notwendiger Textbausteine) und dem Abgleich mit einem semantischen Netzwerk (Beispiel auf Basis der deutschen Sprache: GermaNet). Dieses Netzwerk behandelt Mehrdeutigkeiten (transportieren ~ bewegen) und dient als Grundlage für das Assistenzsystem.
2. **Anforderungsverarbeitung:** Ein Schlüsselbereich der Forschung, der als Grundlage für dieses Projekt dient, ist die Digitalisierung natürlicher Sprache. Sie dient als methodischer Ansatz zur Erfassung und Definition von Anforderungen an das Assistenzsystem R2D2-Twin. Eine Möglichkeit der geführten Anforderungsaufnahme mittels natürlicher Sprachverarbeitung ist der Einsatz eines Sprachdialogsystems. Ein geführter Dialog mit einer KI hilft dabei, das Vorhaben des Kunden vollständig und korrekt zu erfassen. In diesem Projekt soll das Dialogsystem als Unterstützung bei der Erfassung und Vervollständigung von Anforderungen eingesetzt werden.

**Projektpartner:**

**Kontakt:**
Erik-Felix Tinsel, M.Sc.
erik-felix.tinsel@isw.uni-stuttgart.de

# INTEGRATION BESTEHENDER PROTOKOLLE IN KONVERGENTE TSN-NETZE (Brownfield TSN)

**GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK)**

**Die Digitalisierung der Produktion im Rahmen von Industrie 4.0 ist essentiell für den Hochtechnologiestandort Deutschland und bietet insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen die Chance, durch innovative Lösungen langfristige Wettbewerbsvorteile zu erlangen. Obwohl TSN als Basistechnologie branchenübergreifend akzeptiert wird, sind effizient nutzbare konvergente Netze noch eine Zukunftsvision. Neben potentiellen Komplikationen auf der Datenebene ist insbesondere die Konfiguration eine große Herausforderung. Absehbar ist, dass Lösungen in verschiedenen Kombinationen für viele Jahre konkurrieren werden, ohne eine Interoperabilität zu bieten. Systeme mit klassischen Feldbussen in ein konvergentes Netz zu integrieren erfordert meist spezielle Hardware und Software. Diese als Brownfield-Netzwerke bezeichneten Lösungen werden die nächsten Jahre die industrielle Kommunikation dominieren.**

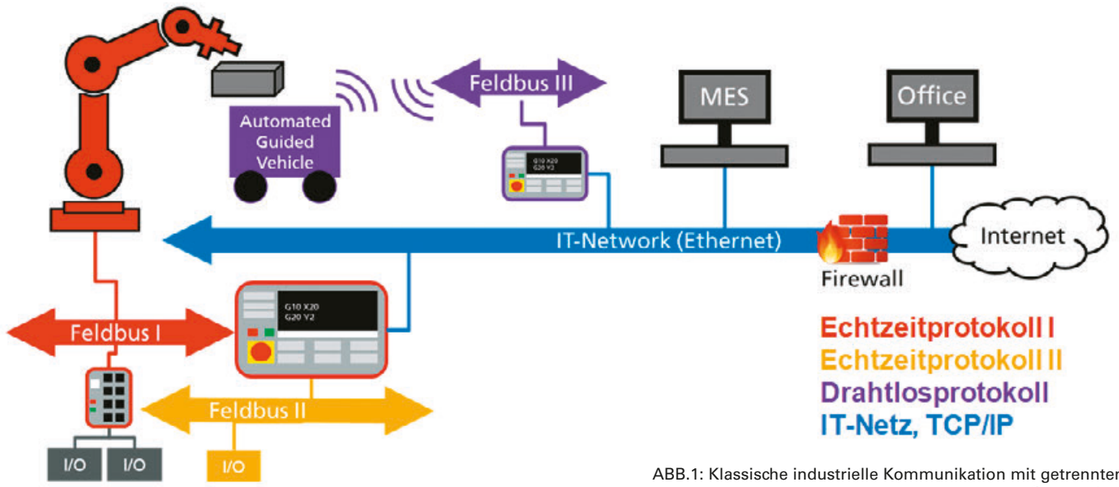



ABB.1: Klassische industrielle Kommunikation mit getrennten Segmenten.

Im Rahmen des Projekts sollen die Vorteile konvergenter Netze effizient nutzbar gemacht werden, so dass es Unternehmen ermöglicht wird, ihre Ressourcen und Innovationskraft auf die eigentlichen Applikationen zu fokussieren.
Hierzu soll ein systematisches Verständnis für konvergente Netze im industriellen Umfeld geschaffen werden. Um dieses Wissen direkt nutzen zu können, soll es in eine Auslegungsmethodik für konvergente Netze und Endgeräte einfließen. Durch konkrete Handlungsempfehlungen werden auch nicht-Experten befähigt, die Vorteile konvergenter Kommunikation in Brownfield-Szenarien zu nutzen.
Die Methodik soll durch ein grafisches Softwarewerkzeug unterstützt werden, welches das systematisierte Wissen einfach für konkrete Anwendungsfälle nutzbar macht.
Identifizierte zentrale Use Cases sollen prototypisch umgesetzt werden und als Referenz mit Open-Source-basierten Implementierungen zur Verfügung stehen.

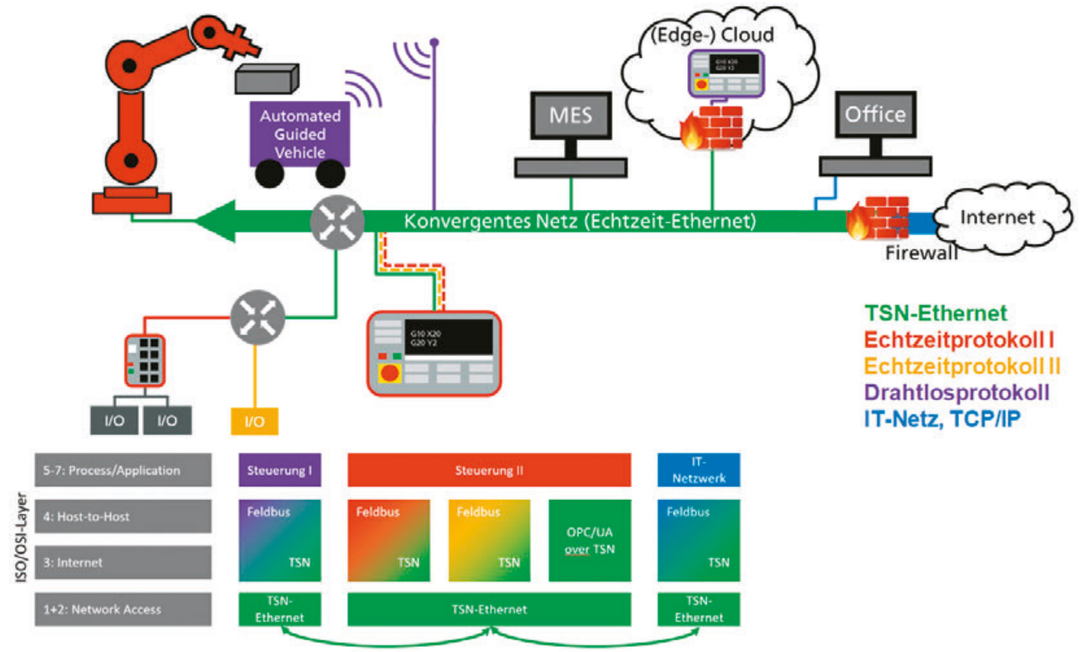



ABB.2: Industrielle Kommunikationsinfrastruktur in einem konvergenten Netz: Alle Teilnehmer teilen sich ein gemeinsames Medium.

Wesentlicher Bestandteil ist dabei der zeitnahe Transfer entsprechender Teilergebnisse in reale Anwendungen durch die Projektpartner, um eine Rückkopplung in Bezug auf Tauglichkeit und Akzeptanz zu erreichen.

**Projektpartner:** DFAM

**Kontakt:**
Hannes Grabmann, M.Sc.
hannes.grabmann@isw.uni-stuttgart.de

DEUTSCHES HANDBUCH DER

**WEITERBILDUNG**

▶ ZUSATZQUALIFIKATIONEN ▶ FÖRDERMÖGLICHKEITEN ▶ PERSONALENTWICKLUNG

2023

**Deutsches Handbuch der**

**WEITERBILDUNG**

Anfragen zur kostenfreien Übersendung von Belegexemplaren, zwecks redaktioneller Mitarbeit oder zur Schaltung Ihrer Anzeigen richten Sie bitte an

**Alpha Informationsgesellschaft mbH**
Finkenstraße 10 · D–68623 Lampertheim
magazine@alphapublic.de · www.alphapublic.de



## FLUIDE FAHRZEUGPRODUKTION FÜR DIE MOBILITÄT DER ZUKUNFT (FluPro)

**GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG**

Bundesministerium für Bildung und Forschung

**Ziel des Verbundprojekts Fluide Produktion ist, ein menschzentriertes, cyberphysisches Produktionskonzept für die Automobilproduktion zu entwickeln und exemplarisch zu implementieren. Hierfür werden alle Produktionsmittel in ortsflexible Module aufgebrochen, um so dynamisch Maschinensysteme bilden und auflösen zu können und die heute übliche Trennung zwischen Wertschöpfung und Logistik aufzuheben. Dabei können cyberphysische Produktionssysteme (CPPS) bedarfsgerecht zu neuen Betriebsmitteln zusammengeschlossen werden.**

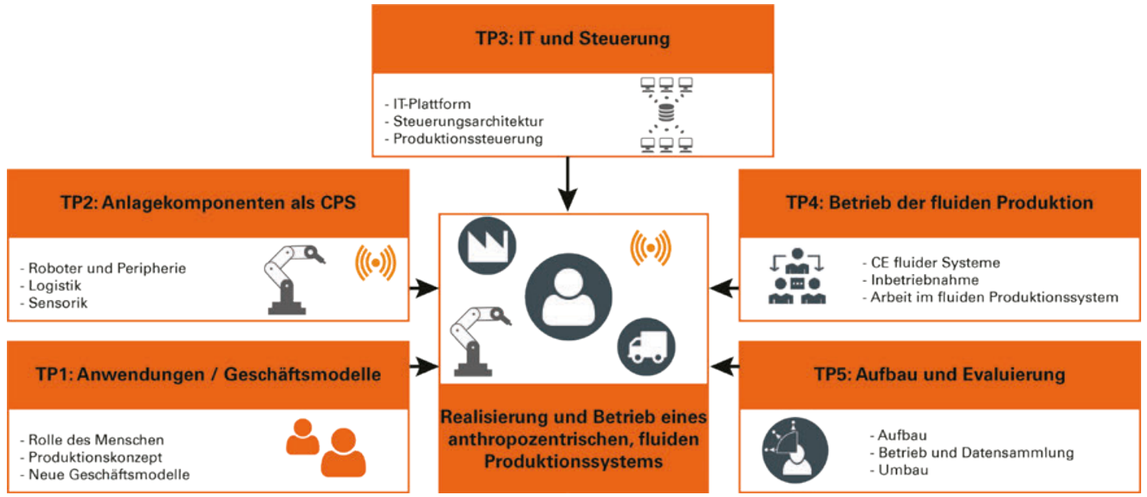



ABB.1: Aufteilung des Projekts in Teilprojekte.

Die Automobilproduktion der Zukunft und die darin arbeitenden Menschen werden sich permanent an geänderte Rahmenbedingungen anpassen müssen, um sich ändernde Kundenbedarfe zu erfüllen zu können und um im internationalen Wettbewerb zu bestehen. Die Vision des Projekts Fluide Produktion umfasst die Entwicklung, den Aufbau, die Freigabe, den Betrieb und die Erforschung eines Produktionssystems, das komplett aus cyberphysischen Systemen besteht, welche ortsflexibel und dynamisch zu Maschinen kombiniert werden können. Hierdurch wird es möglich, Entscheidungen, die heute Stunden, Tage oder teils sogar Monate vor dem Zeitpunkt der Wertschöpfung getroffen werden müssen, erst kurz vor dem Zeitpunkt der Wertschöpfung zu treffen. So kann das Produktionssystem schnell auf Änderungen in den an es gestellten Anforderungen reagieren, jederzeit und ohne Unterbrechung der Produktion neue Produkte aufnehmen und Verschwendung im Sinne des Lean Gedankens (Muda) durch falsche Vorfestlegungen wird auf ein Minimum reduziert.

Der Begriff Fluide Produktion entspringt der Vision, dass sich cyberphysische Systeme permanent bedarfsgerecht neu zu Betriebsmitteln zusammenschließen; hierdurch passt sich die Produktion – ähnlich einem Fluid, das seine äußere Form gemäß den auf es wirkenden Drücken anpasst – stets optimal an den aktuellen Bedarf an. Eine Übersicht über die wichtigsten Aspekte der Fluiden Produktion zeigt **ABB.1.** Adressiert werden folgende Kernherausforderungen: die steigende Unsicherheit und strukturelle Varianz des Automobilbaus und die schlechte Beherrschbarkeit der Produktionstechnik durch den Menschen.

**Vorgehensweise**

Die Realisierung des Fluiden Produktionssystems basiert auf fünf Teilprojekten, (**ABB. 1**): Im ersten Teilprojekt (**TP1**) werden Fluide Produktionen geplant und auf Industrie 4.0-Services aufbauende Geschäftsmodelle entwickelt.

Zentraler Aspekt bei der Planung fluider Produktionen (**TP1**) ist stets die Einbeziehung der Bedarfe des Menschen als zentrales Moment der technischen Entwicklung. Im zweiten Teilprojekt (**TP2**) werden die cyberphysischen Module des fluiden Produktionssystems als „produktionstechnische Fluidpartikel" entwickelt und prototypisch umgesetzt. Das dritte Teilprojekt (**TP3**) vertieft Fragen der Produktionssteuerung von der Auftrags- bis zur Echtzeitsteuerung und widmet sich der Spezifikation der CPS als Industrie 4.0-Komponenten. Im vierten Teilprojekt (**TP4**) wird untersucht welche Methoden und Unternehmensprozesse notwendig sind, um die mittels der in **TP2** und **TP3** erarbeiten technischen Ergebnisse mögliche Wandlungsfähigkeit in der betrieblichen Praxis nutzbar zu machen; hierzu zählen insb. die Freigabe von sich ändernden Betriebsmitteln und die Gestaltung der Arbeit in einem sich ständig ändernden Produktionssystem. Im fünften Teilprojekt (**TP5**) wird die Fluide Produktion am Beispiel von zwei Produkten umgesetzt und getestet.

**Aufgabenbereiche des ISWs im Projekt FluPro**

Das **Teilprojekt 3** – IT und Steuerung – wird unter der Leitung des ISWs durchgeführt und hat zur Aufgabe, die Ausgestaltung und Erforschung der Steuerung des fluiden Produktionssystems von der Auftragssteuerung bis zur Echtzeitsteuerung durchzuführen.

Das erste Arbeitspaket in diesem Teilprojekt ist die Konzeption einer Echtzeitnahen und Modularen Steuerungsarchitektur. Hierzu sollen bisherige monolithische Steuerungsstrukturen aufgebrochen werden und übergeordnete Module zur Steuerung eines ganzheitlichen Prozesses ausgelagert werden. Schwerpunkt ist die Vernetzung der einzelnen Module unter Berücksichtigung der Anforderungen an Performanz und echtzeitkritisches Verhalten. Die durchzuführenden Arbeiten identifizieren eine mögliche Aufspaltung bestehender Steuerungssysteme und die Auslagerung auf die Plattform, welche im 2ten Arbeitspaket bereitgestellt wird.

Beim 3ten Arbeitspaket steht das Ziel, die Entwicklung neuer Methoden der Produktions- und Versorgungslogistik im Hinblick auf die spezifischen Anforderungen der Fluiden Produktion, im Vordergrund. Die implementierten Methoden werden am definierten Produktionssystem auf ihre logistische Zielerreichung im Vergleich zu klassischen PPS-Methoden bewertet.

Die Geschehnisse im Shopfloor digital abzubilden sind die Ziele des 4ten Arbeitspakets. Dadurch wird permanent aktuelles, automatisch generiertes Abbild (Modell) der Realität die Planung, Steuerung und Optimierung aller Fabrikprozesse ermöglicht und damit die Zukunft erfassbar und die Wandlungsfähigkeit wirtschaftlich beherrschbar gemacht.

Damit alle verwendeten Komponenten im Projekt sowohl mit der übergeordnete IT als auch untereinander kommunizieren können, wird im letzten Arbeitspaket das Modell für die Industrie 4.0-Komponente definiert. Die Industrie 4.0-Komponente ist ein Referenzmodell für Semantik, Syntax und Modellebeschreibungen von Komponenten, die in Industrie 4.0-Wertschöpfungsnetzwerken miteinander agieren. Auf diese Weise können auch cyberphysische Systeme (CPS) und deren Eigenschaften über den Lebenszyklus hinweg beschrieben werden.

**Projektpartner:** ARENA2036

**Kontakt:**
Carsten Ellwein, M.Sc.
carsten.ellwein@isw.uni-stuttgart.de

**Wir bieten Dir:**
- Attraktives Gehaltspaket
- Urlaubs- und Weihnachtsgeld
- Betriebliche Altersvorsorge
- Fahrradleasing
- Bezuschussung der Kantine
- Individuelle Weiterbildungsmöglichkeiten

top EMPLOYER INGENIEURE DEUTSCHLAND 2021
CERTIFIED EXCELLENCE IN EMPLOYEE CONDITIONS

Bewirb Dich an unserem **Standort Wört/Dinkelsbühl**,
um treibende Kraft der Mobilitätswende zu sein.
Bewerbung sowie weitere Stellenangebote online unter **careers.te.com**

**TE Connectivity Germany GmbH**
Ampèrestraße 14 | 73499 Wört
Ampèrestraße 11 | 91550 Dinkelsbühl

EVERY CONNECTION COUNTS

TE Connectivity, TE, TE connectivity (logo) und EVERY CONNECTION COUNTS sind Marken der TE Connectivity Ltd. Unternehmensgruppe oder sind von dieser lizensiert.

**Universität Stuttgart**
Institut für Steuerungstechnik
der Werkzeugmaschinen und
Fertigungseinrichtungen

**Wir steuern Zukunft: Innovativ. Interdisziplinär. Wissenschaftlich.**

Das breite Forschungsspektrum des Instituts bietet stets interessante Themen zur Auswahl, wobei ständig eine Vielzahl konstruktiv, experimentell und theoretisch orientierter Aufgabenstellungen vorliegt.

Studierende aller Studiengänge, in deren Prüfungsordnung eine studentische Arbeit im Bereich der Ingenieurwissenschaften vorgesehen ist, können diese am ISW anfertigen, insbesondere Studierende des Maschinenbaus, der Mechatronik, der Technischen Kybernetik und des Technologiemanagements.

Immer aktuelle Themen finden Sie unter:
**https://www.isw.uni-stuttgart.de/lehre/studentische-arbeiten/**

**Bachelor-, Studien-, Masterarbeiten**
**zu vergeben**

ISW

## POST-DOC TANDEM STELLE (FH-Personal)

**GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG**

Bundesministerium für Bildung und Forschung

**Ziel der Tandem Stelle ist die Qualifikation von professoralem Personal für Hochschulen für angewandte Wissenschaften. Die Stelle setzt sich inhaltlich aus den drei Säulen Industrie, Lehre und Forschung zusammen. Innerhalb von drei Jahren wird so die erforderliche Mindest-Qualifikation für eine FH-Professur erreicht.**

Das ausgeschriebene Schwerpunktthema der Stelle ist „digitaler Zwilling“. Dabei wird der Industrieanteil bei der Firma ISG realisiert. Hier wird das Simulationsmodell einer Anlage, Maschine oder allgemein in der Produktion, als möglicher Teil des digitalen Zwillings aufgefasst und erforscht. Dafür werden Forschungsprojekte im Bereich der Echtzeit-Anlagensimulation betreut und akquiriert. In den Projekten wird sowohl die Simulationsgenauigkeit betrachtet, als auch die Anbindung des Modells an vorangehende Engineeringprozesse. Zudem wird untersucht, wie Simulationsmodelle in einer Numerischen Steuerung verwendet werden können, um hier modellbasierte Ansätze zu etablieren. Dabei ist die Idee, dass durch Hinzufügen von Information zur Steuerung die Effektivität und Genauigkeit sowie die Bedienbarkeit dieser erhöht werden. Die Herausforderung ist jedoch, die Informationen an die Steuerung zu übertragen sowie diese dort zu verwenden. Als zusätzliche Information können zum Beispiel Informationen zu Fertigungsflächen oder auch zum Zielprozess selbst angesehen werden. Für ersteres ist der betrachtete Anwendungsfall, dass Verbünde von B-Spline-Flächen, sogenannte „Compounds“, in ihrer parametrischen Beschreibungsform direkt übergeben werden und nicht vorher diskretisiert werden. Für zweiteres, wurde bereits am ISW ein Projekt zur Automatisierung von Metallgießen bearbeitet. Im Rahmen des Projektes wurde eine Numerische Steuerung über aus einer Volumenbilanz resultierenden Prozessgleichungen mit zusätzlichem Prozesswissen ausgestattet. Da die Gleichungen einen Zusammenhang zwischen Bewegung von Maschinenachsen und gegossenem Volumen herstellen, konnte so die Maschinenprogrammierung vereinfacht werden. Dabei gewonnene Erkenntnisse und Anforderungen an die Steuerung sollen weiter im Rahmen dieses Projektes untersucht werden. Besonders interessant ist dabei, wie die im Simulationsmodell festgelegten Prozessparameter in die Trajektorienplanung der Steuerung integriert werden.

Neben der Forschung und Industriearbeit werden zwei Semesterwochenstunden an der FH-Esslingen zum Thema Regelungstechnik gehalten. So wird die Qualifikationsmaßnahme um die zwingend notwendige Erfahrung im Bereich der Lehre abgerundet.

**Projektpartner:** Hochschule Esslingen, ISG

**Kontakt:**
Anja Elser, M.Sc.
anja.elser@isw.uni-stuttgart.de





## KOLLABORATIVE SMART SERVICES FÜR INDUSTRIELLE WERTSCHÖPFUNGSKETTEN IN GAIA-X (COSMIC-X)

COSMIC-X

**GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG**

Bundesministerium für Bildung und Forschung

**Industrie 4.0 und die Vernetzung von Unternehmen und Daten eröffnen Einsparpotenziale, Synergien und Mehrwerte. Mit der europäischen Dateninfrastruktur GAIA-X wurde die Grundlage geschaffen, um vertrauenswürdige und sichere datenbasierte Informations- und Geschäftsmodelle in Produktion und Dienstleistung zu ermöglichen.**

Das zweijährige Forschungsprojekt COSMIC-X (Collaborative Smart Services for Industrial Value Chains in Gaia-X) wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert und bringt führende Industriepartner mit Forschungseinrichtungen zusammen. COSMIC-X nutzt die GAIA-X Infrastruktur, um weitere Anforderungen an den unternehmensübergreifenden Datenaustausch zu definieren und exemplarische Lösungen umzusetzen. Dabei werden, wie in **ABB. 1** visualisiert, die drei Anwendungsfälle digitale Zwillinge, vertrauenswürdige Lieferketten und plattformbasierte Wartung analysiert. Anschließend werden auf Basis von Industrial Data Spaces und Advanced Smart Services Lösungen entwickelt, um diese Anwendungsfälle zu realisieren. Die enge Kooperation mit dem Forschungsprojekt Uranos-X gewährleistet die Übertragbarkeit der Ansätze auf andere Wirtschaftsbereiche.

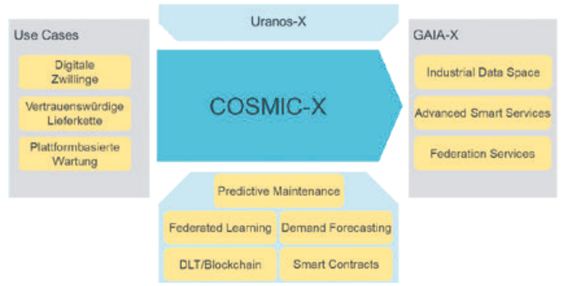



ABB.1: COSMIC-X Systemübersicht mit Anwendungsfällen und Anknüpfungspunkten.

Mit der zunehmenden Digitalisierung der Industrie werden neue Wertschöpfungsketten realisierbar. So eröffnet der Austausch von Daten Einsparpotenziale, Synergien und Mehrwerte. Daten werden zum Wirtschaftsgut und ermöglichen neue Geschäftsmodelle. Mit diesen Chancen entstehen aber auch neue Risiken, weshalb Datensicherheit, Datenintegrität und Datensouveränität eine zentrale Rolle spielen. Gerade für kleine und mittlere Unternehmen sind dies hohe Einstiegshürden. Unter anderem aus diesen Gründen wurde die europäische Dateninfrastruktur GAIA-X ins Leben gerufen. Standardbasierte, aber auch individualisierbare oder dezentrale Bausteine bieten hier einen Gegenpol „Made in Europe“ zu proprietären, monopolartigen Lösungen außereuropäischer Anbieter. Durch Spezifikation von Daten- und Infrastruktur-Ökosysteme wird hiermit die Grundlage für vertrauenswürdige und sichere Informations- und Geschäftsmodelle geschaffen.

Unternehmen nutzen die von Maschinen und Anlagen erfassten Daten derzeit vor allem für unternehmensinterne Optimierungen und Dienstleistungen. Der nächste große Schritt ist die unternehmensübergreifende Nutzung dieser Daten. Damit ergeben sich jedoch neue Anforderungen an die Daten und damit einhergehend neue Herausforderungen bei der Umsetzung dieser Anforderungen. Beispielsweise ist der Nachweis der Korrektheit der Daten eine Herausforderung, die nicht besteht, wenn die Daten nur unternehmensintern genutzt werden. Sollen auf Basis der Daten jedoch Kosten kalkuliert oder Bestellungen getätigt werden, reicht das reine Vertrauen nicht mehr aus – ein Nachweis der Korrektheit ist erforderlich.

Ziel des Forschungsprojektes COSMIC-X ist es, drei exemplarische Anwendungsfälle für datenbasierte Geschäftsmodelle von Industrieunternehmen auf Basis von GAIA-X Infrastrukturen zu realisieren. Dabei werden in einem ersten Schritt die Anforderungen an einen unternehmensübergreifenden Datenaustausch definiert. Gemeinsam mit den Technologiepartnern werden anschließend aktuelle Technologien wie Blockchain, Föderiertes Lernen und Containerisierung als Lösungsansätze betrachtet. Der Weg zu GAIA-X konformen Lösungskonzepten wird durch eine enge Zusammenarbeit mit dem wissenschaftlichen Projekt Uranos-X unterstützt.

**Projektpartner:** DATARELLA, HAWE HYDRAULIK, HFU, inovex, KROHNE, SW, Stackable

**Kontakt:**
Timo König, M.Sc.
timo.koenig@isw.uni-stuttgart.de

# AUTOMATISCHE STEUERUNGSPROGRAMMIERUNG MITTELS KI FÜR INDUSTRIELLE ANWENDUNGEN (KI-Steuerung)

GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG

Bundesministerium für Bildung und Forschung

**Am ISW wird daran geforscht, die Potentiale die der digitale Zwilling bietet, mit den neuen Methoden aus dem Bereich des Maschinellen Lernen zusammenzuführen. Der digitale Zwilling, besonders die zugehörigen Simulationsmodelle, bieten eine gute Lernplattform in denen ein intelligenter Algorithmus automatisch nach optimalen Lösungen suchen kann. Dadurch kann beispielsweise ein Steuerungsentwickler bei seiner Arbeit unterstützt werden, indem die bisher vom Menschen ausgeführte iterative und testbasierte Lösungssuche, durch einen Lernalgorithmus automatisch durchgeführt wird.**

Der Wettbewerb und der digitale Wandel erhöhen die Anforderungen an produzierende Unternehmen und insbesondere die internen Produktionsprozesse enorm. Um den Anforderungen gerecht zu werden, benötigen besonders kleine und mittlere Produktionsunternehmen flexible, automatisierte Produktionssysteme. Aktuell scheitert dies jedoch zu oft an der komplexen Steuerungsprogrammierung.
Die Programmierung von komplexen CNC-Maschinen wird bereits heute durch Simulationsumgebungen unterstützt. Die Simulationen verhalten sich hinsichtlich Schnittstellen, Parametern und Betriebsarten wie die realen Komponenten. Somit werden realistische Test- und Inbetriebnahmesituationen nachgestellt. Hierdurch kann ein Zeitvorteil vom Start der Entwicklung bis zum Betrieb einer Maschine und Anlage erreicht werden, indem große Teile der Steuerungsprogrammierung nach vorne gezogen werden. Der zeitliche Entwicklungsaufwand an sich wird jedoch nicht verkürzt.
Ziel des Verbundvorhabens „KI-Steuerung“ ist die Entwicklung einer neuartigen, automatisierten Steuerungsprogrammierung mithilfe von Maschinellem Lernen: KI-Steuerung. Die Idee ist es, erstmals die Simulationsumgebung zur automatischen Steuerungsentwicklung und Optimierung zu verwenden. Dadurch wird der Software-Entwicklungsprozess massiv verkürzt und die Investitionskosten für ein Umstellen auf eine Produktvariante deutlich reduziert. Der Ansatz basiert auf der in der Abbildung zu erkennenden Analogie zwischen der sogenannten X-in-the-Loop Simulation (zum Testen der Steuerung) und einem Reinforcement Learning Ansatz (zum automatischen Erlernen von Lösungsstrategien für Probleme).
Im Projekt wird eine Lernumgebung geschaffen welche sich aus Modellen der virtuellen Inbetriebnahme und einer virtualisierte CNC-Steuerung zusammensetzt, um ein möglichst realitätsnahes Szenario für den Lernalgorithmus aufzubauen. Die Lernumgebung soll zudem den Standards aus dem Bereich des Reinforcement Learnings entsprechen, damit der Transfer von bereits etablierten Algorithmen möglichst einfach erfolgen kann. Dadurch, dass die Lernalgorithmen auf die für das Testen für Steuerungen etablierten Simulationsumgebungen trainiert werden, kann eine ausführlich getestete Steuerungslösung gefunden bzw. optimiert werden.

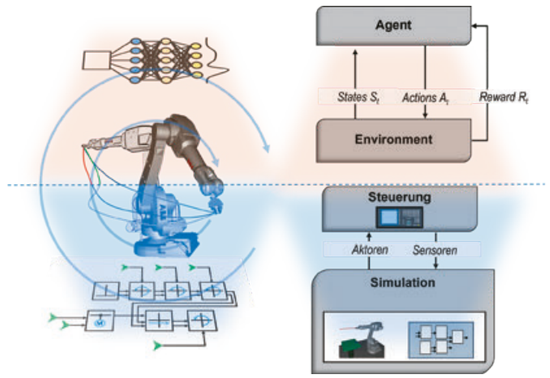



ABB.1: Vergleich von Reinforcement Learning (oben) und X-in-the-Loop Simulation (unten).

**Projektpartner:** iT ENGINEERING SOFTWARE INNOVATIONS, ISG

**Kontakt:**
Florian Jaensch, M.Sc.
florian.jaensch@isw.uni-stuttgart.de





# HYBRIDES INTERAKTIONSKONZEPT FÜR SCHULUNGEN MITTELS MIXED REALITY IN THE LOOP SIMULATION (MRiLS)

GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG IM RAHMEN DES FÖRDERPROGRAMMS „KMU-INNOVATIV“

Bundesministerium für Bildung und Forschung

**In diesem Forschungsprojekt wird die Entwicklung und Erprobung einer Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) zur Schulung technischer Fachkräfte im Maschinen- und Anlagenbau untersucht. Die MRiLS koppelt die aus dem Engineering bereits vorhandenen Modelle der Hardware-in-the-Loop Simulation (HiLS) mit Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality (MR) und integriert dadurch den Nutzenden und dessen Verhalten sowie die reale Umgebung vollständig in den Simulationskreislauf.**

Kaum ein Berufsbild hat sich in den letzten Jahrzehnten so schnell gewandelt wie das von technischen Fachkräften: In den 80er Jahren löste die Einführung der Fabrikautomation völlig neue Disziplinen aus, die neue Berufsbilder erforderlich machte. Heute stehen mit dem Wandel hin zur Smart Factory mit einer immer weiter zunehmenden Komplexität neuartiger Automatisierungslösungen ähnliche Herausforderungen an, sodass Lehrinhalte zunehmend komplexer werden. Gut ausgebildete Fachkräfte stellen dabei die Grundlage für die Sicherung von Wohlstand am Wirtschaftsstandort Deutschland dar. Moderne AR- und VR-Technologie in Interaktion mit dem Menschen können dabei helfen, die benötigten Schulungen als eine der zentralen Zukunftsaufgaben an den rasanten Wandel der Produktionsverfahren, -maschinen und Bedienungskonzepte anzupassen (**ABB.1**).
Ziel des Projekts ist ein neuartiges hybrides Interaktionskonzeptes für die Schulung von technischen Fachkräften mittels einer „Mixed Reality in the Loop“-Simulation (MRiLS). Dafür wird das in **ABB.2** dargestellte Konzept erforscht. Als Grundlage für die Erstellung des Schulungsmodells wird das bereits im Engineering bestehende Simulationsmodelle der virtuellen Inbetriebnahme verwendet. Darauf aufbauende wird das kundenindividuelle Mixed Reality in the Loop Simulationsmodelle, samt individueller Schulungsunterlagen und -szenarien erstellt. Durch die Kombination realer Hardware und virtuellem Simulationsmodell sowie die realistische, virtuelle „Antwort“ des Objektes mittels MR können dynamische Prozesse besser vermittelt werden. Mittels visueller und räumlicher Darstellungen, sowie ergänzenden Lehrinhalten (z.B. Audiokommentare, Erklärungen, „Röntgenblick“ in den Innenraum, etc.) werden unterschiedliche interaktive Lernprozesse unterstützt.

ABB.1: Vorteile einer Mixed Reality in the Loop Simulation für Schulungsinhalte.

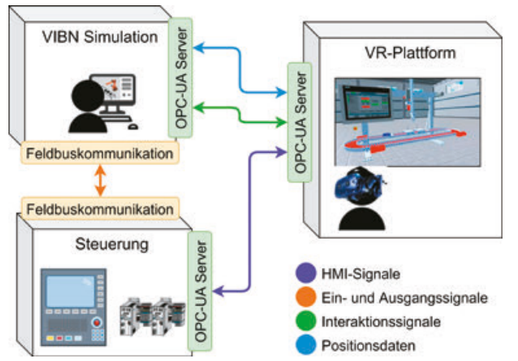



ABB.2: Konzept der MRiLS zur Anbindung von Steuerung und Verhaltensmodell.

**Projektpartner:** Hochschule Esslingen University of Applied Sciences, ROTH STEUERUNGSTECHNIK, ISG

**Kontakt:**
Daniel Littfinski, M.Sc.
daniel.littfinski@isw.uni-stuttgart.de

# GRUNDLAGEN UND VERFAHRENSPRINZIPIEN FÜR DIE HERSTELLUNG CO2-NEUTRALER UND RESSOURCENEFFIZIENTER BAUTEILE (Biobeton)

**GEFÖRDERT VOM BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG (BBSR) IM AUFTRAG DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR WOHNEN, STADTENTWICKLUNG UND BAUWESEN (BMWSB) AUS MITTELN DES INNOVATIONSPROGRAMMS ZUKUNFT BAU**

**In diesem Forschungsprojekt wird die Entwicklung und Erprobung einer Fertigungsmethode zur Herstellung prototypischer Bauteile aus Biobeton untersucht. Biobeton bezeichnet dabei ein Gemisch aus Sand und biologisch erzeugtem Zementersatz, wodurch ein potentiell CO2-armer Baustoff der Zukunft gewonnen werden kann.**

Nahezu unbegrenzte Formbarkeit, hohe Festigkeit und gute bauphysikalische Eigenschaften machen Beton zum meist verwendeten Baumaterial der Welt. Zur kontinuierlichen Materialversorgung der Bauindustrie werden weltweit pro Jahr 4,1 Milliarden Tonnen Zement gebrannt und etwa die siebenfache Menge Sand und Kies abgebaut. Dieser enorme Bedarf wird in den nächsten 30 Jahren durch einen Bevölkerungszuwachs von bis zu 2,7 Milliarden Menschen noch weiter ansteigen. Das Brennen von Zement verursacht bereits heute bis zu 8 % der anthropogenen CO2-Emissionen. Der übermäßige Abbau von Kies und Sand führt zur Zerstörung ganzer Ökosysteme und Sandknappheit in einigen Regionen der Welt. Zur Verbesserung der ökologischen Bilanz der Bauindustrie ohne Unterbrechung der Materialversorgung werden ressourcenschonende und emissionsarme Technologien benötigt, die die Vorteile von klassischem Beton beibehalten.
Dem Forschungsvorhaben liegt das, Ende des 20. Jahrhunderts entdeckte, Naturphänomen der mikrobiologisch induzierten Calzitausfällung (engl. kurz MICP) zugrunde. Dieses Verfahren wird heutzutage jedoch nur im Straßenbau und in der Herstellung von Ziegelsteinen verwendet. Der industrielle Einsatz von MICP für tragende Betonteile wurde bisher jedoch nicht ganzheitlich untersucht. Das Forschungsvorhaben Biobeton findet deshalb interdisziplinär in Kooperation mit dem Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) und dem Institut für Mikrobiologie (IMB) statt.
Dazu sollen Verfahrensprinzipien entwickelt werden, mit denen konzipierte Bauteile aus mikrobiologisch kalzifiziertem Sandstein hergestellt werden können. Für dieses Verfahren wird ein Prototyp für die steuerbare und regelbare Materialverarbeitung entwickelt. In dem schichtweisen Verfahren besprüht ein Druckkopf selektiv das Sandgemisch mit einem Medium zur Bakterienaktivierung. Nach Vollendung des Druckprozesses verweilt das Bauteil einige Tage im Pulverbett, bis es eine ausreichende Festigkeit erhält, um entnommen zu werden. Die im Projekt durchgeführten Versuche

ABB.1: Mittels Additiver Fertigung hergestellter Probekörper aus Biobeton.

zeigen die Verarbeitbarkeit des Materials mittels pulverbettbasierter Additiver Fertigung. Verwendet wird dabei eine auf maximale Packungsdichte optimierte Sandmischung, welche gleichzeitig die zur „Zementierung“ notwendigen Bakterien enthält.
Zusätzlich werden weitere Verfahrensprinzipienuntersucht, bei denen der Biobeton in eine zuvor gefertigte Schalung gegossen und anschließend mit dem bakterienaktivierenden Medium geflutet wird. Hierbei stellt insbesondere die erreichbare Zementierungstiefe eine Herausforderung dar, da die Bakterien zur Calzidausfällung Sauerstoff benötigen, dessen Zufuhr in tieferen Schichten nicht immer gewährleistet werden kann. Die Validierung erfolgt anhand von Material- und zerstörenden Prüftestreihen an Probekörpern, die mit unterschiedlichen Verfahrensprinzipien hergestellt wurden.

**Projektpartner:** ILEK, Universität Stuttgart Institut für Mikrobiologie

**Kontakt:**
Maximilian Nistler, M.Sc.
maximilian.nistler@isw.uni-stuttgart.de





# AUDIS DEVELOPMENT ENVIRONMENT FÜR AUTOMATISCHE SUBROUTINEN-OPTIMIERUNG VON INDUSTRIEROBOTERN AUS DER CLOUD (DAsCloud)

**GEFÖRDERT VON DER AUDI AG**

**In diesem Forschungsprojekt wird der Cloud-Service Skynet entwickelt, der es ermöglicht, Subroutinen von Roboterprogrammen mit Daten aus der Produktion automatisch situationsbedingt anzupassen. Die unkomplizierte Einrichtung des Optimierers wird durch eine IDE ermöglicht und ist auch mit geringen Programmierkenntnissen möglich. Durch Skynet werden die steigenden Anforderungen an die Vernetzung und Wandlungsfähigkeit der Produktion im Kontext von Industrie 4.0 und Software-Defined Manufacturing (SDM) gezielt bei Anwendungen mit Robotern in Angriff genommen.**

Durch Industrie 4.0 und Software-Defined Manufacturing (SDM) steigen die Anforderungen an die Vernetzung und Wandlungsfähigkeit von Produktionen. Besonders starr und unvernetzt sind hierbei Fertigungsprozesse mit Industrierobotern, da diese mit ihrem eigenen gekapselten festdefinierten Programm laufen, welche bei jeder Änderung komplett ersetzt werden müssen und zu einem Produktionsstillstand führt.
Aufgrund der einzuhaltenden Automatisierungs- und Sicherheitsstandards sowie einiger Einschränkungen bei der Ansteuerung von Robotern, ist eine dynamische Anpassung im Betrieb nicht möglich. Roboterprogramme mit alternativen Programmabläufen einzurichten, ist aufwändig und kann nicht jeden möglich Fall im Vorfeld abdecken.
Dieses Forschungsprojekt baut darauf auf, dass die neuen Robotersteuerungen von Fanuc und Kuka mit einer Funktion ausgestattet wurden, die es erlaubt Unterprogramme im laufenden Betrieb auszutauschen ohne einen Stillstand auszulösen oder Sicherheitsvorkehrungen zu unterbrechen.
Der geplante Cloud-Service zur Roboterprogrammoptimierung trägt den Namen Skynet und besteht aus drei Komponenten. **ABB. 1** zeigt den Aufbau und die Funktionsweise von Skynet.
Der Datensammelpunkt sammelt die für die Optimierung notwendigen Prozessdaten aus der Produktion. Der Optimierungsalgorithmus verwendet diese Daten, um ein angepasstes Roboterprogramm zu generieren. Das neue Programm wird dabei nach dem VASS-Standard und den Audi internen Vorgaben erstellt. Das Programm wird im Skynet-Endpunkt gespeichert und bei Anforderung aus dem Prozess an den Roboter übertragen.

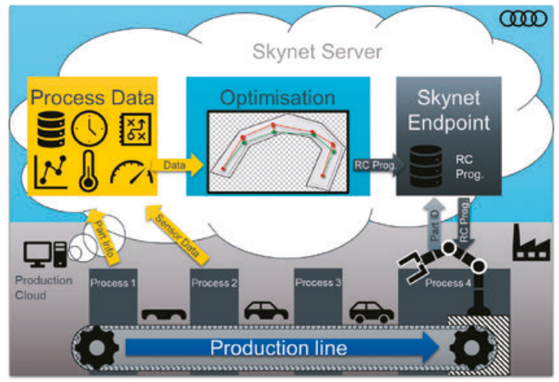



ABB.1: Aufbau und Funktionsweise von Skynet (Audi_DAsCloud).

Durch eine umfangreiche IDE mit Toolbox und Konfigurator soll die Einrichtung des Optimierungsalgorithmus auf dem Skynet Server stark vereinfacht und dadurch auch für Domänenexperten mit geringen Programmierkenntnissen möglich.

**Kontakt:**
Maximilian Koch, M.Sc.
maximilian.koch@isw.uni-stuttgart.de

## UPCYCLING-FILAMENTE AUS THERMOFORMPRODUKTIONSABFÄLLEN (UpFilT)

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN BUNDESSTIFTUNG UMWELT (DBU)

**In diesem Forschungsprojekt wird die Entwicklung und Erprobung einer Fertigungsmethode zur Verbesserung der Steifigkeit von massiven Werkzeugmaschinenkomponenten bei gleichzeitiger Minimierung der Masse und Erhöhung der Fertigungsflexibilität angestrebt. Dabei wird das Ergebnis einer kombinierten Parameter- und Topologieoptimierung zunächst auf ein FE-Modell (Finite Elemente Modell) der zu optimierenden Struktur angewandt und anschließend die resultierende Struktur durch Laminated Object Manufacturing (LOM-Technik) hergestellt.**

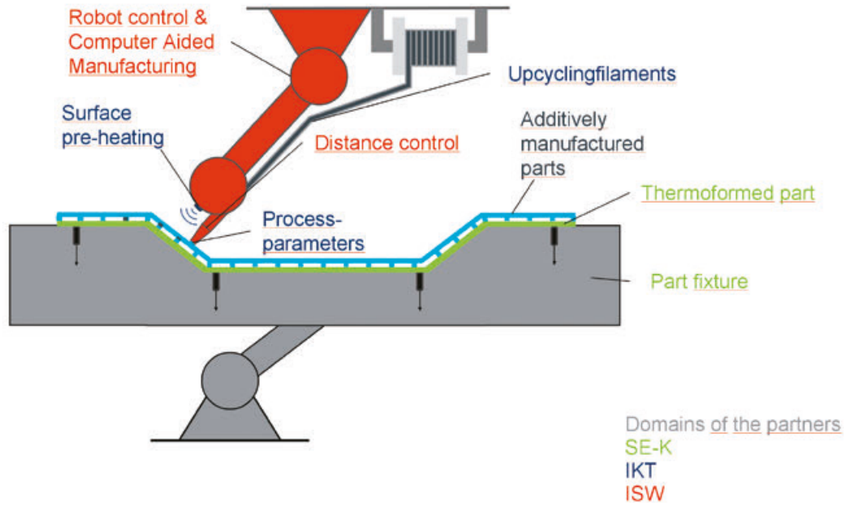



ABB.1: Übersicht über das neue Fertigungsverfahren.

Das UpFilt-Projekt hat die Rückführung von Verschnittresten aus dem Thermoform-Prozess in die Fertigung höherwertiger Produkte zum Ziel – das sogenannte Upcycling. Erreicht werden soll dies durch die Herstellung eines hochwertigen Kunststoff-Filaments aus den Abfällen, welches ergänzt durch ein neuartiges Verfahren der Additiven Fertigung direkt für die Erweiterung des ursprünglichen, thermogeformten Bauteils verwendet werden kann.
Angestrebt wird mit dem Verfahren vorrangig eine Reduktion des Abfalls, eine Reduktion des Gesamtenergiebedarfs und die Erhöhung der möglichen Formgebungsvielfalt und Bauteilkomplexität, bei gleichzeitiger Homogenisierung des eingesetzten Materials. Insbesondere der letztgenannte Punkt hat langfristig positive Auswirkung durch die wesentliche Verbesserung der Recyclebarkeit am Ende des Produktlebenszyklus'. Durch die höhere Formgebungsfreiheit wird das Thermoformen bei kleinen Losgrößen darüber hinaus zu einer Alternative für das Spritzgießverfahren.
Diese Ziele sollen durch zwei wesentliche Entwicklungen erreicht werden. Zuerst wird ein zuverlässiges Verfahren zum Upcycling von Kunststoffabfällen zu Kunststofffilament entwickelt, das sich für die Verwendung im Fused Filament Fabrication (FFF) Verfahren eignet. Die Entwicklung des Materials umfasst dabei nicht nur die Methodik zur reproduzierbaren Wiederaufbereitung des Verschnittmaterials, sondern auch eine umfangreiche, rheologische und mechanische Charakterisierung der damit hergestellten Filamente.
Den zweiten wesentlichen Baustein bildet das innovative 3D-Druckverfahren, welches es ermöglicht, Funktionselemente wie Verstärkungsrippen oder Rastverbindungen direkt an die Rückseite des Bauteils anzudrucken, also das Bauteil zu hinterdrucken. Für dieses Ziel wird das Verfahren des mehrachsigen FFF-3D-Drucks erweitert, sodass eine Bedruckung der weitgehend freiförmig gekrümmten Rückseite des Thermoformbauteils in hoher struktureller Qualität möglich wird. Dies ist im Stand der Technik nur durch aufwändige, manuelle Klebeprozesse möglich, die zudem die Materialvielfalt im Bauteil erhöhen und damit die Recyclebarkeit beeinträchtigen. Zur Verbesserung der Prozessgüte und -zuverlässigkeit werden hier neue Verfahren zur Regelung des Düsenabstands zum Bauteil und des Druckkopfverhaltens, sowie ein Oberflächenaktivierungsverfahren entwickelt und in eine prototypische Demonstrationsanlage integriert.
Wesentlicher Inhalt des ISW im UpFilT Projekt ist die Erforschung von Steuerungs- und Regelungsansätzen, die es ermöglichen, das Thermoformbauteil zuverlässig zu bedrucken. Dazu gehört die Entwicklung einer Roboterzelle zum mehrachsigen Drucken, aber auch neue Ansätze zur Bahnplanung und Prozessregelung, die durch die hohe Varianz der Bauteile notwendig werden.

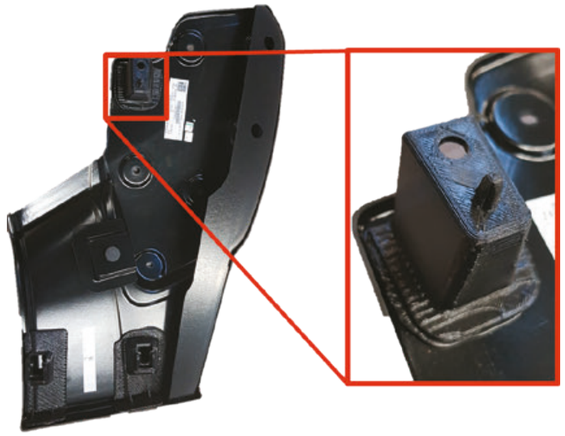


ABB.2: Ein Prototyp des Verfahrens. Das Funktionselement ist hier (noch) auf das Thermoformteil geklebt.

ABB. 3: EEin Versuchsbauteil mit direkt aufgedruckten Funktionselementen.

**Kontakt:**
Martin Wolf, M.Sc.
martin.wolf@isw.uni-stuttgart.de

# OPEN SOLUTIONS IM KONTEXT VON TIME-SENSITIVE NETWORKING (TSN)

## ISW EIGENENTWICKLUNG

**Essentiell für die Realisierung vieler Industrie 4.0 Visionen ist ein durchgehender Datenzugriff durch alle Hierarchieebenen der Produktion hinweg. Dazu sind konvergente Netze, welche IT- und OT-Systeme verbinden und Echtzeitkommunikation sowie Best-Effort-Traffic gleichzeitig transportieren, notwendig. Als entscheidende Enabling-Technologie wird branchenübergreifend die Erweiterung von Standard-Ethernet um deterministische Fähigkeiten im Kontext von Time-Sensitive Networkings (TSN) gesehen. Aktuell mangelt es jedoch noch an Methoden und Tools für die Umsetzung sowie für das Engineering TSN-basierter Netzwerke und verteilter Echtzeitanwendungen. In verschiedenen Projekten und Open-Source Aktivitäten sollen offene Lösungen für diese Probleme entstehen.**

Kommunikation über alle Ebenen der Produktionspyramide hinweg ist Voraussetzung für viele innovative Ansätze bei der Digitalisierung der Produktion und zur Erreichung von Wandlungsfähigkeit. Dies ist aufgrund der Vielzahl zueinander inkompatibler Feldbusse und dem mangelnden Determinismus von klassischen IT-Netzen bisher nur schwer realisierbar. Momentan wird das in der IT bewährte Ethernet im Rahmen von IEEE802.1 um deterministische Eigenschaften ergänzt (Time-Sensitive Networking – TSN) und als Schlüsseltechnologie für konvergente Netze gesehen.
Zur Erreichung einer wandlungsfähigen und flexiblen Produktion, müssen zusätzlich Applikationen mit deterministischen Anforderungen (wie z.B. SPS-Applikationen, NC-Steuerungen) dynamisch im Netzwerk deployt und ausgeführt werden können. Daraus ergibt sich eine dynamische verteilte Echtzeitanwendung, bestehend aus mehreren einzelnen Echtzeitapplikationen, die auf verschiedenen Endgeräten im Netzwerk verteilt sein können.
Die Kombination aus konvergentem Netzwerk und dynamisch umzusetzender Kommunikation bringt neben Flexibilität auch zusätzliche Komplexität mit sich. Dazu zählt das Engineering dieses Gesamtsystems, bestehend aus dem TSN-basierten Netzwerk und der darin ausgeführten verteilten Echtzeitanwendung. In dem Forschungsprojekt ControlTSN wurde ein Open-Source Framework für diesen Zweck mit dem Ziel entwickelt, dies in zukünftigen Engineering-Tools einzusetzen (**ABB. 1**).
Den Kern des Frameworks stellt eine zentrale Daten- und Funktionsschnittstelle dar. Um bestimmte Funktionen bereitzustellen, werden daran unterschiedliche Module angeschlossen:

- **Applikations-Modul:** Orchestrierung und Konfiguration der einzelnen Echtzeitapplikationen, sowie der übergeordneten Echtzeitanwendung.

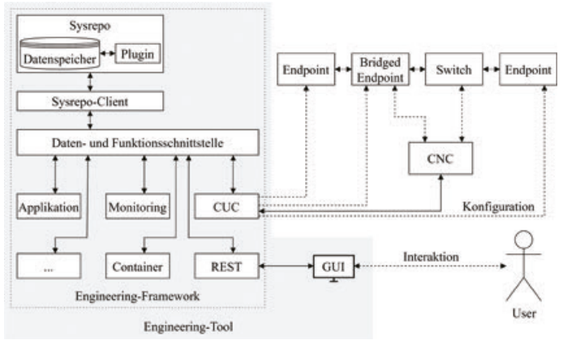



ABB.1: Architektur des Frameworks für das Engineering verteilter Echtzeitanwendungen in einem TSN-basiertem Netzwerk.

- **Monitoring-Modul:** Überwachung von Kommunikationsmetriken (z.B. Latenzen, Jitter, Synchronität) und der Zustände der Applikationen.
- **CUC-Modul:** Stellt die Schnittstelle zum zentralen Netzwerkmanagement dar und leitet Kommunikationsanforderungen der Applikationen an diese zur Koordinierung des zeitlichen Kommunikationsablaufes weiter. Die sich ergebenden Konfigurationen werden von der CUC an die jeweiligen Endgeräte übermittelt.
- **Container-Modul:** Orchestrierung und Deployment der (containerisierten) Echtzeit-Applikationen auf den physischen Endgeräten.
- **Interface-Modul:** Schnittstelle zur Interaktion mit einem web-basierten Engineering-Tool (z.B. über REST).

Zusätzlich beinhaltet das Framework einen auf dem Datenmodell YANG basierten Datenspeicher.

Das entwickelte Framework ist ein Enabler für das Engineering TSN-basierter Netzwerke und verteilter Echtzeitanwendungen.
Neben dem Engineering werden auch Endpunkte in weiteren Projektaktivitäten betrachtet. Die notwendigen Konfigurationen vom Framework werden an den Endpunkt übergeben, allerdings mangelt es hier bisher an einer einheitlichen Methode zur Verwendung dieser Informationen. Dementsprechend wurde hierfür eine weitere Architektur entworfen, die ebenfalls als Open Source Lösung zur Verfügung gestellt wird.
Die Architektur ähnelt dabei der des Frameworks (**ABB. 2**) und umfasst die zwei Hauptbestandteile Endpoint-Daemon und Endpoint-Library. Der Daemon läuft dabei als eigene Instanz auf dem Endpunkt und stellt eine zentrale Konfigurationsschnittstelle zur Verfügung (beispielsweise mittels OPC UA). Die erhaltenen Daten werden in einem Datenspeicher persistent zur Verfügung gestellt.
Die Endpoint-Library erfüllt den Zweck einer Abstraktionsschicht für die Implementierung von Echtzeitapplikationen und der deterministischen, TSN-basierten Kommunikation. Durch den Endpoint-Daemon wird eine Schnittstelle zum Datenspeicher bereitgestellt, wodurch applikationsspezifische Konfigurationen abgefragt werden können.
Die Architektur berücksichtigt dabei zudem die Ausführung paralleler Echtzeitapplikationen auf einem Host-System. Zum einen liefert die Schnittstelle zum Datenspeicher nur die jeweils für diese Anwendung relevanten Konfigurationsdaten und zum anderen kann die Konfiguration der (virtualisierten) Netzwerkschnittstellen und des Kernel-Schedulers automatisch durch ein Plugin gelöst werden.
Das vorgestellte Framework in Kombination mit der Architektur für Endpunkte dient als Grundlage verteilte Echtzeitanwendung in TSN-basierten Netzwerken.

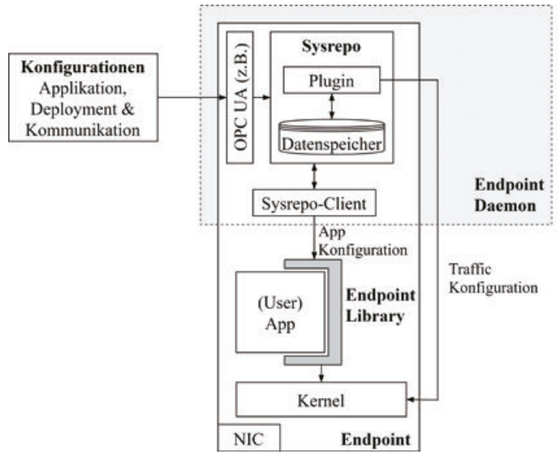



ABB.2: Architektur für einen Endpunkt als Teil einer verteilten Echtzeitanwendung in einem TSN-basiertem Netzwerk.

**Kontakt:**
Stefan Oechsle, M.Sc.
stefan.oechsle@isw.uni-stuttgart.de

Dipl.-Ing. Philipp Neher
philipp.neher@isw.uni-stuttgart.de

Dipl.-Ing. Florian Frick
florian.frick@isw.uni-stuttgart.de

# VIRTUOS GYM - VIRTUELLEN INBETRIEBNAHME SIMULATION ALS LERNUMGEBUNG FÜR LERNFÄHIGE STEUERUNGEN

## (Hardware-/Software-in-the-Loop Gym)

## ISW EIGENENTWICKLUNG

**Am ISW wird an Methoden und Ansätzen geforscht, die aktuelle Entwicklungen und Fortschritte der künstlichen Intelligenz in die Produktionstechnik bringen. Dabei sind sowohl Ansätze für den Einsatz an Maschinen und Anlagen interessant, als auch Methoden, die den Entwicklungs- bzw. Engineering-Prozess betreffen. Für die steigenden Anforderungen der Produktionstechnik müssen die Steuerungssysteme intelligenter und lernfähig werden. Die Ansätze von maschinellem Lernen sind am ISW eng an den digitalen Zwilling gekoppelt, da dieser zum einen die Möglichkeit gibt, Wissen zu repräsentieren und zum anderen auch eine Entwicklungsplattform für kognitive Systeme darstellt. Dafür wird vom ISW jetzt eine Plattform für die Forschung bereitgestellt, welche das Simulationswerkzeug ISG-virtuos mit dem OpenAI Gym Standard zusammenführt.**

**Reinforcement Learning zur Steuerung industrieller Prozesse**
Reinforcement Learning hat in vielen, zumeist noch nichtkommerziellen Bereichen, beeindruckende Ergebnisse erzielt. Ein entscheidender Faktor spielt dabei die Lernumgebung, innerhalb derer der Agent interagieren kann. Für industrielle Anwendungen (Maschinen, Anlagen und Roboter) scheidet das reale System aufgrund der Fehler aus, die der Agent für ein erfolgreiches Lernen unweigerlich macht. Diese Fehler sind kostenintensiv und z.T. gefährlich für das System. Stattdessen müssen künstliche Umgebungen geschaffen werden. Im Zuge der Virtualisierung des Engineerings ist eine solche künstliche Lernumgebung ohne großen Mehraufwand möglich. Hardware- oder Software-in-the-Loop (HiL/SiL)-Simulationen sind Stand der Technik, wenn es um die Virtuelle Inbetriebnahme geht. Dabei wird die reale Steuerung in Verbindung mit einer virtuellen Maschine oder Anlage entwickelt, validiert und getestet.
Am ISW wird der Ansatz verfolgt, genau diese HiL Simulationsmodelle als Lernumgebung für eine kognitive Steuerung zu verwenden.

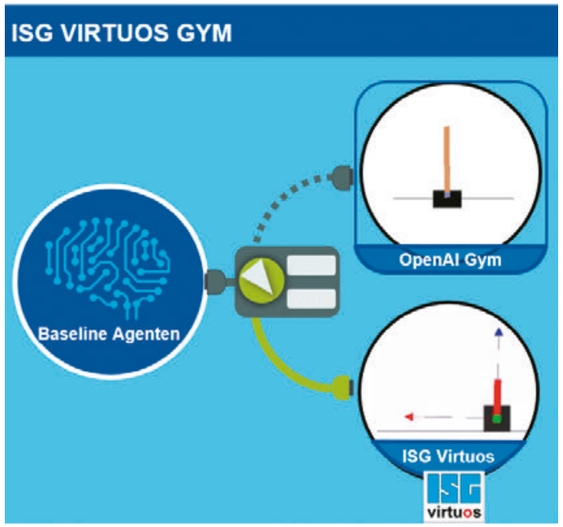



ABB.1: Sinnbild der VIBN Lernumgebung – Ermöglicht die Verwendung von Lernalgorithmen welche mit dem OpenAI Gym Standard funktionieren.

**Standardisierung der HiL/SiL-Lernumgebung**
Bei der erfolgreichen Übertragung von Reinforcement Learning Methoden in die Produktionstechnik, ist es entscheidend, auf existierende und aktuelle Ressourcen zurückzugreifen. OpenAI, Google und Microsoft liefern standardisierte Lernumgebungen für Lernalgorithmen. Das mit Abstand beliebteste Toolkit kommt von OpenAI. OpenAI Gym bietet Open Source Lernumgebungen für bspw. Atari Spiele, physikbasierte Simulationen und unteraktuierte Steuerungsprobleme. OpenAI Gym definiert dadurch einen Standard für Lernumgebungen, was den Aufbau und die Schnittstellen betreffen.

ABB.2: Eigenentwicklung der VIBN Lernumgebung als ISG-virtuos Gym – Beispielcode und Beispielmodelle verfügbar im TwinStore.

Dazu stellt OpenAI noch Open Source Baseline Algorithmen zur Verfügung, welche die wichtigsten Entwicklungen und Fortschritte der aktuellen Forschung beinhalten. Diese Baseline Algorithmen werden laufend verbessert und erweitert.
Den Anbietern fehlt aktuell jedoch eine produktionstechnische Simulationsumgebung oder eine geeignete Ankopplung der Toolkits an industrielle Problemstellungen. Am ISW wird diese Schnittstelle durch eine HiL/SiL-Lernumgebung geschlossen.
Die HiL/SiL-Simulationsumgebung ISG-virtuos wird damit erweitert und mit Schnittstellen versehen, dass sie den OpenAI Standard für Lernumgebungen erfüllt. Dadurch kann, wie in **ABB.1** dargestellt wird, ein Baseline Reinforcement Learning Algorithmus ohne Anpassung sowohl das OpenAI Gym als auch die HiL/SiL-Lernumgebung lösen. Die bisher nur für das Testen der Steuerung entwickelten Modelle der Maschine oder Anlage, können somit auch als Trainingsumgebung für intelligente Steuerungen verwendet werden.
Am ISW gibt es erste Lösungen zur Demonstration der Potentiale der HiL/SiL-Lernumgebung. Diese wird jetzt über den TwinStore(http://www.virtuos-twinstore.de) der ISG anderen Forschungseinrichtungen und Unternehmen als Basis für eigene Arbeiten zur Verfügung gestellt (siehe **ABB 2**). Das TwinStore Paket beinhaltet die ISG-virtuos Erweiterung zum OpenAI Gym, sowie zwei Beispielmodelle und -Code zum schnellen starten und experimentieren.

**Kontakt:**
Florian Jaensch, M.Sc.
florian.jaensch@isw.uni-stuttgart.de

LageRegelSeminar

**Lageregelseminar**

Auf der zweitägigen Veranstaltung geben unsere Referenten aus Industrie und Forschung einen spannenden Überblick zu aktuellen Forschungsergebnissen und Entwicklungen aus der Robotik, Antriebs- und Maschinentechnik und der Additiven Fertigung. Hierfür werden praxisbezogene experimentelle Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

Weitere Informationen zur Veranstaltung finden Sie unter:

**www.lageregelseminar-stuttgart.de**

ORGANISATION ISW
VERANSTALTER FISW

# VIRTUELLER TISCHKICKER

## ISW EIGENENTWICKLUNG

**Durch die Hardware-in-the-Loop Simulation „Virtueller Tischkicker“ wird auf spielerische Weise die Qualität der Ausbildung der Studierenden am ISW gesteigert.**

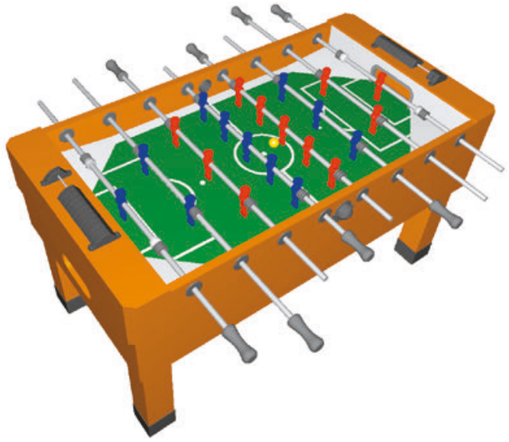


ABB.1: Virtuelles Spielfeld in Virtuos.

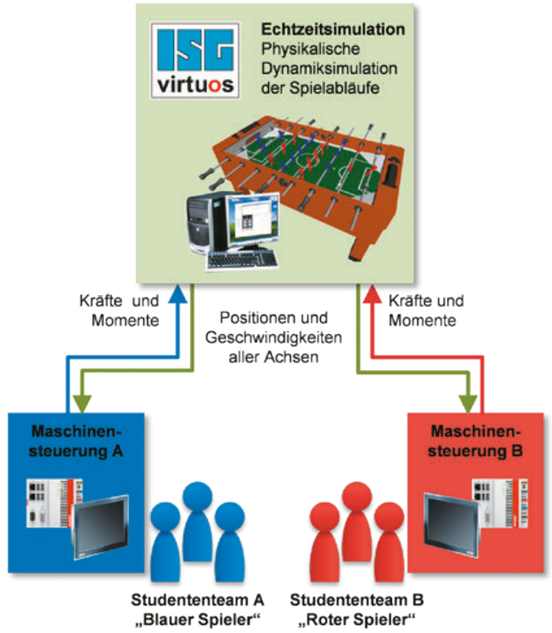



ABB.2: Prinzipskizze des virtuellen Tischkickers.

Lehrveranstaltungen wie Vorlesungen (Steuerungstechnik, Simulationsgestützte Planung und Auslegung von Produktionsanlagen, ...) oder Projektarbeiten werden jedes Jahr an der Universität Stuttgart Studierenden unterschiedlicher Studiengänge (Maschinenbau, Mechatronik, Technische Kybernetik, Simulation Technology, ...) absolviert.
In diesen Lehrveranstaltungen werden die Themengebiete SPS-Technik, CNC-Technik und deren Programmierung, Echtzeitsimulation und Bus-Topologien behandelt. Im Hinblick auf die Verbesserung des Praxisbezuges und der Anwendbarkeit dieser theoretischen Lehrinhalte wurde ein virtueller Tischkicker mit simuliertem Spielfeld in der Echtzeitsimulationsumgebung ISG-virtuos aufgebaut (siehe **ABB. 1**). Der Tischkicker basiert auf einem Echtzeitsimulationsrechner mit einer 3D-Visualisierung für das virtuelle Spielfeld, welcher durch zwei Motion-Control-Steuerungen (SPS/MC) und vier mechatronische Eingabegeräte angesteuert werden kann. So kann Steuerung gegen Steuerung gespielt werden (siehe **ABB. 2**). Das Ziel ist, den Einsatz von Echtzeitsimulationen und das Zusammenspiel von Steuerungs- und Kommunikationstechnik, sowie Mechanik, Sensorik und Aktorik zu demonstrieren.
Studierende sollen die Steuerungsprogrammierung und Entwicklung von Algorithmen an diesem Demonstrator „spielerisch“ erlernen und umsetzen (Steuerung gegen Steuerung). Des Weiteren ist im Rahmen studentischer Arbeiten und durch Hilfswissenschaftliche Mitarbeiter ein Handbediengerät für den virtuellen Tischkicker entstanden, das es ermöglicht, dass auch der Mensch gegen Steuerung spielen kann (siehe **ABB. 3**). Der virtuelle Tischkicker wird in folgenden Bereichen als Lehrsystem genutzt:

**Projektarbeit**
Im Rahmen der Projektarbeit im Bereich der Mechatronik wird jedes Jahr ein Wettbewerb ausgerichtet. Dabei sollen studentische Teams Spieler auf Basis von SPS- und MC-Steuerungsprogrammen entwickeln und diese gegeneinander antreten lassen. Sie erwerben im Laufe dieser Projektübung Wissen in den Bereichen Echtzeitsimulation, SPS/MC-Programmierung, Kommunikationstechnik und die Inbetriebnahme von Maschinensteuerungen.

**Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten**
Diese Arbeiten werden in den Bereichen Echtzeitsimulation, Steuerungstechnik und Konstruktion ausgeschrieben.





**Anschauungsobjekt**
Es besteht die Möglichkeit, das Lehrmodell bei publikumswirksamen Veranstaltungen, wie dem Tag der Wissenschaft, Unitag, GirlsDay und Messen einzusetzen.

**Kontakt:**
Lars Klingel, M.Sc.
lars.klingel@isw.uni-stuttgart.de

Daniel Littfinski, M.Sc.
daniel.littfinski@isw.uni-stuttgart.de

ABB.3: Handbediengerät des virtuellen Tischkickers.

# AUTOMATISIERTER SPANFERKELGRILL

## ISW EIGENENTWICKLUNG

Im Rahmen verschiedener studentischer Arbeiten wurde am ISW ein vollautomatisierter Spanferkelgrill entwickelt. Dieser Grill ermöglicht es den Studierenden, alle Schritte von der Konstruktion bis zur steuerungstechnischen Inbetriebnahme zu durchlaufen. Die Studierenden können Erfahrungen mit kommerziellen Steuerungstechnikkomponenten in spielerischer Umgebung sammeln. Der Grill verfügt über zwei Servoachsen für die Rotation des Spießes und für die Abstandsregelung des Feuerkorbs. Über Temperatursensoren werden die Temperatur des Feuers, sowie die Kern- und Oberflächentemperatur des Schweins gemessen. Daraus werden von einer CNC-Steuerung Sollsignale für die Motoren generiert. Die Bedienung erfolgt über eine Browserapp, welche über OPC UA an die Steuerung angebunden ist.

In aktuellen studentischen Arbeiten wird der vollautomatisierte Spanferkelgrill um einen modellgetriebenen selbstadaptiven digitalen Zwilling zur kontinuierlichen Evaluation und Optimierung des Grillverhaltens erweitert.

**Kontakt:**
Ann-Kathrin Splettstößer, M.Sc.
ann-kathrin.splettstoesser@isw.uni-stuttgart.de

## LERNPLATTFORM STÄUBLI-ZELLE

**ISW EIGENENTWICKLUNG**

**Knickarmroboter sind heutzutage aus der Industrie nicht mehr wegzudenken. Der Einsatz von Robotern ist in den letzten Jahren zum Trend geworden und die Anzahl der zur Automatisierung eingesetzten Roboter nimmt weiterhin stetig zu. Das Ziel des ISW ist es daher die Studierenden mit dieser zukunftsweisenden Technologie vertraut zu machen.**

Die Programmierung und Steuerung von Industrierobotern unterscheidet sich deutlich von der klassischen Steuerungstechnik aus dem Werkzeugmaschinenbereich. Zurückzuführen ist dies auf den besonderen mechanischen Aufbau von Industrierobotern als kinematische Kette. Dadurch ergeben sich Vorteile, wie ein großer Arbeitsraum und hohe Flexibilität durch die somit zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade. Jedoch bringt die Technologie auch steuerungstechnische Herausforderungen, beispielsweise redundante Achsstellungen oder Singularitäten im Arbeitsraum, mit sich.
Um Studierende für die Robotik zu begeistern und gleichzeitig für die damit einhergehenden steuerungstechnischen Problemstellungen zu sensibilisieren, bietet das ISW Praktika zur Roboterprogrammierung an. Hier werden die Studierenden spielerisch aber auch mit wissenschaftlichem Hintergrund an die Herausforderungen der Robotik herangeführt. Für die Praktika stehen den Studierenden am ISW die zwei, in **ABB. 1** dargestellten, Stäubli TX-40 Knickarmroboter zur Verfügung. Für die zwei Knickarmroboter werden herstellereigene Steuerungen eingesetzt, die über eine externe Schnittstelle mit einer Beckhoff TwinCAT Soft SPS verbunden sind. Somit lässt sich die gesamte Zelle zentral ansteuern. TwinCAT dient dabei als übergeordnete Steuerungseinheit und kommuniziert über Feldbus mit den Robotersteuerungen. Weiterhin bietet die Lernplattform eine Schnittstelle zu MATLAB/Simulink, womit den Studierenden weitreichende Funktionen und umfangreiche Toolboxen zur Umsetzung eigener Lösungen zur Verfügung stehen. In **ABB. 2** ist ein Überblick der beschriebenen Steuerungsarchitektur dargestellt. Die Lernplattform bietet Studierenden somit die Möglichkeit, sich zukünftigen Fragestellungen der Automatisierungstechnik, beispielsweise die Kollaboration von Robotern zu untersuchen, die bestehenden Herausforderungen zu erkennen und aktuelle Problemstellungen praxisnah zu lösen.

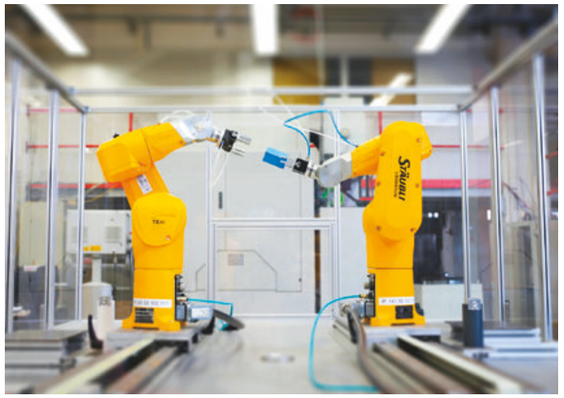


ABB.1: Praktikumszelle mit zwei Stäubli TX-40 Knickarmrobotern.

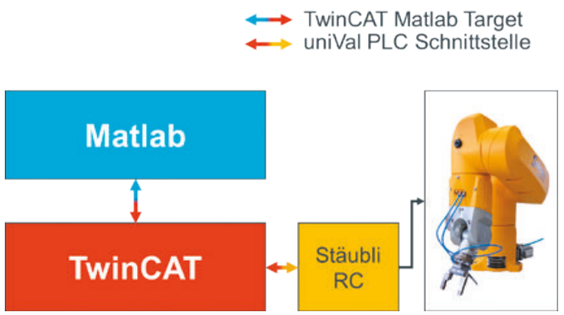



ABB.2: Steuerungsarchitektur der Lernplattform.

**Kontakt:**
Thomas Reichenbach, M.Sc.
thomas.reichenbach@isw.uni-stuttgart.de

David Dietrich, M.Sc.
david.dietrich@isw.uni-stuttgart.de





## ISW ROBOTIKBAND

**ISW EIGENENTWICKLUNG**

**Als optischer Blickfang auf Messen und zur Demonstration der ISW Open Automation Platform (OAP) wurde das Studentenprojekt RobotikBand ins Leben gerufen. Gesteuert von der OAP spielen echte Instrumente vollautomatisch gemeinsam verschiedene Lieder. Studenten wird damit die Möglichkeit geboten, neben dem Studium praktische Erfahrung mit Steuerungs- und Regelungstechnik sowie industriellen Kommunikationsmechanismen zu sammeln.**

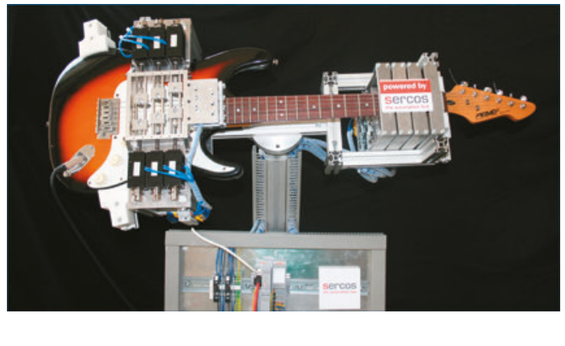



ABB.1: Robotik-Gitarre.

Die seit mehreren Jahren am ISW kontinuierlich weiterentwickelte RobotikBand bietet Studierenden der Fachrichtungen Mechatronik, Maschinenbau, Technologiemanagement sowie Fahrzeug- und Motorentechnik die Möglichkeit praktische Erfahrungen mit Steuerungshardware und -technik zu sammeln. Sie besteht aktuell aus einer automatisierten Gitarre und einem Schlagzeug (s. **ABB. 1** und **ABB. 2**). Die Instrumente erhalten von einer zentralen Steuereinheit die Befehle, zu welchem Zeitpunkt eine Saite gezupft oder Trommel geschlagen werden soll. Die Musikinformationen liegen dabei im standardisierten Midi Format vor, so dass die Band jedes beliebige Lied spielen kann. Um zu gewährleisten, dass alle Instrumente zur selben Zeit die gewünschten Töne spielen, ist ein schneller Informationsaustausch notwendig. Hierfür wird auf eine Mischung aus industriellen Komponenten und einer echtzeitfähigen Feldkommunikation gesetzt, welche auf Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) über Time-Sensitive Networking (TSN) basiert.

**Kontakt:**
Wolfgang Bubeck, M.Sc.
wolfgang.bubeck@isw.uni-stuttgart.de

ABB.2: Robotik-Schlagzeug.

# OPEN AUTOMATION PLATFORM (OAP)

## ISW EIGENENTWICKLUNG

**Innovative Konzepte der Steuerungs- und Regelungstechnik lassen sich häufig mangels offener Schnittstellen und Performance nicht auf konventionellen Prozessor-basierten Plattformen umsetzen. Im Rahmen verschiedener Forschungsarbeiten wurde eine offene Plattform entwickelt, welche neben Freiheitsgraden auf der Hardware- und Software-Ebene zusätzlich eine FPGA-Ebene bietet. Hierdurch kann die OAP auch höchsten Anforderungen hinsichtlich Performance gerecht werden. Neben antriebstechnische Aufgaben, wird sie für die Prozessregelung, Sensorikanwendungen und Kommunikationstechnik eingesetzt.**

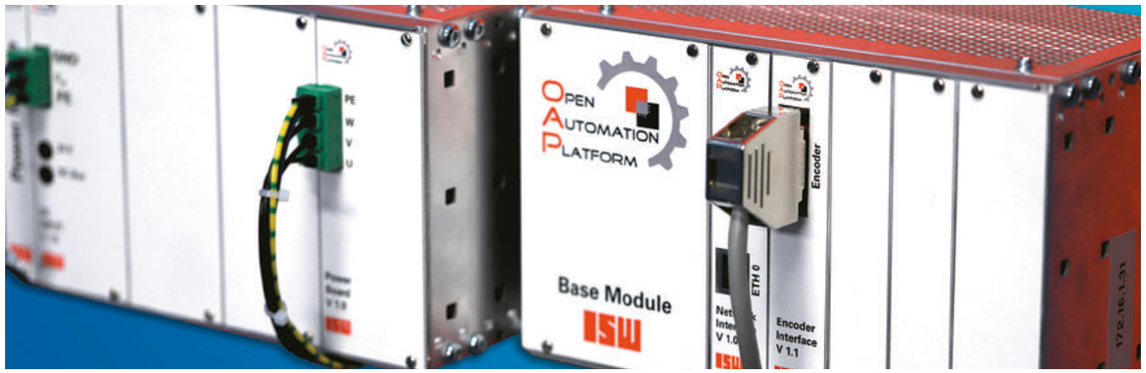



ABB.1: Modulare Hardware-Ebene der OAP.

Die Umsetzung innovativer Ansätze in der Steuerungs- und Regelungstechnik scheitert oft an der mangelnden Offenheit und der begrenzten Performance, insbesondere bei komplexen Algorithmen wie beispielsweise modellbasierter Regelung. Rekonfigurierbare Hardware in Form von FPGAs bietet dank Hardware-Performance kombiniert mit der Flexibilität von Software eine leistungsfähige Plattform. Um diese neue Technologie effizient nutzen zu können, wurde in verschiedenen Forschungsarbeiten die **Open Automation Platform** (OAP) am ISW entwickelt (**ABB. 1**). Sie kommt in der Antriebstechnik, Prozessregelung, Sensortechnik und Kommunikationstechnik zum Einsatz. Beispielhaft seien verschiedene Projekte im TSN-Umfeld, das Projekt Adaptive PWM, die Ansteuerung eines Lasers für die additive Fertigung oder die RobotikBand erwähnt. Zur Maximierung der Synergieeffekte werden die Ergebnisse einzelner Projekte in eine Bibliothek von Hardware-, FPGA-, und Software-Komponenten zurückgespielt.

Die OAP bietet Offenheit auf den folgenden drei Ebenen:

**Hardware-Ebene:** Auf unterster Ebene steht eine Vielzahl von Schnittstellen zur Verfügung, welche modular und anwendungsspezifisch kombiniert werden können. Dies sind beispielsweise Treiber, Encoder-Schnittstellen, Leistungstreiber oder Kommunikationsmodule. Die FPGA-Logik selbst ist über eine einheitliche Schnittstelle mit den Interfaces gekoppelt. Bild 1 zeigt eine beispielhafte Hardware-Konfiguration mit verschiedenen Schnittstellenmodulen.

**FPGA-Ebene:** Auch die FPGA-Ebene ist modular strukturiert. Dabei wird die Methodik des **System-On-a-Programmable-Chip (SOPC)** genutzt. Diese ermöglicht ein effizientes Systemdesign basierend auf individualisierten sowie Standardkomponenten. Eine stetig wachsende Sammlung steht zur Verfügung, beispielsweise für Interfaces wie Encoder oder verschiedene Feldbusse sowie zur Umsetzung von Reglern und Modellen.

**Software-Ebene:** Als Plattform für die Software können gegenwärtig zwei Optionen genutzt werden: Entweder kommt ein sogenannter **Soft-Prozessor** zum Einsatz, welcher aus FPGA-Ressourcen synthetisiert wird. Alternativ wird Software auf einem Hard-Prozessor ausgeführt, welcher fester Bestandteil des FPGA-Chips ist (z.B. ein ARM-Prozessor). Abhängig von der Anwendung kann entweder eine spezielle Firmware oder aber auch ein Betriebssystem zum Einsatz kommen. Die Software ist ebenfalls modular aufgebaut, wozu objektorientierte Konzepte genutzt werden. Bei Nutzung eines Betriebssystems kann auf Lösungen aus anderen Projekten, beispielweise für OPC UA und TSN, zurückgegriffen werden.

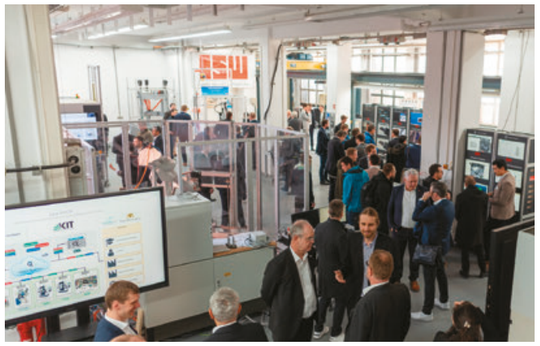
ABB.2: Ebenen und Komponenten der OAP.

**ABB. 2** gibt einen Überblick über die Ebenen der Architektur und zeigt jeweils beispielhafte Komponenten auf. Die Entwicklung erfolgt hierbei in einer funktionalen Sicht über alle Ebenen hinweg. Um dies zu ermöglichen, sind alle Komponenten auf der Software-Ebene repräsentiert.

Die Architektur ermöglicht eine einheitliche Anbindung des Systems an Kommunikationsschnittstellen. Einerseits können spezialisierte Inbetriebnahme- und Forschungswerkzeuge genutzt werden, andererseits ist auch eine Anbindung an verschiedene Feldbusse möglich.

**Kontakt:**
Dipl.-Ing. Florian Frick
florian.frick@isw.uni-stuttgart.de

# DIENSTLEISTUNGEN FÜR DIE INDUSTRIE



Innovationstage am ISW, Hallenbesichtigung.

LAPP IDC Expert Training am ISW.

**Das ISW kooperiert eng mit Industrieunternehmen zu den am Institut bearbeiteten Forschungsthemen und trägt damit dazu bei, den Transfer der Grundlagenforschung in die Industrie sicherzustellen. Darüber hinaus werden Firmen bei Studien und der Umsetzung von Prototypen bis hin zu neuen Produkten durch das Know-How am ISW entsprechend ihrer Anforderungen unterstützt.**

**Beratung und Entwicklung:**

- Innovative Steuerungskonzepte, -architekturen und -algorithmen
- Virtualisierung von Steuerungsfunktionen
- Industrielle Kommunikationstechniken (Time Sensitive Networking – TSN, OPC UA, Ethernet-basierte Bussysteme, ...)
- Datenmodellierung für verschiedenste Branchen des Maschinenbaus
- Sondermaschinenbau für hochdynamische Prozesse
- Aufbau und Gestaltung digitaler Zwillinge
- Modellierung und Simulation von Maschinen und Anlagen
- Konzeption von Steuerungshardware und FPGA-Lösungen
- Maschinen- und Komponentenoptimierung
- Optimierung von Antriebssystemen
- Gestaltung von Digitalisierungskonzepten
- Einsatz und Optimierung additiver Fertigungstechnik

**Schulungen und Seminare:**

- Stuttgarter Innovationstage
- Lageregelseminar
- Ethernet-basierte Kommunikation (OPC UA in der Steuerungs- und Automatisierungstechnik)
- Industriearbeitskreis „TSN for Automation“
- TSN Testbed Plugfest
- Hardware-in-the-Loop-Simulation
- OPC UA Workshops zu Companion Specifications
- Einführung in OPC UA - Grundlagen zu OPC UA
- Individuell auf Kundenanforderungen angepasste Schulungen





## LAGEREGELSEMINAR

LageRegelSeminar

### AUSTAUSCH ZWISCHEN FORSCHUNG UND INDUSTRIE ÜBER INNOVATIONEN AUS DER WELT DER MECHATRONISCHEN SYSTEME UND DER ANTRIEBSREGELUNG

**Auf der zweitägigen Veranstaltung geben unsere Referenten aus Industrie und Forschung einen spannenden Überblick zu aktuellen Forschungsergebnissen und Entwicklungen aus der Robotik, Antriebs- und Maschinentechnik und der Additiven Fertigung. Hierfür werden praxisbezogene experimentelle Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.**

Lageregelseminar 2021 am ISW.

Lageregelseminar 2021, Führung in der ISW-Maschinenhalle.

Unsere Veranstaltungsreihe „Lageregelseminar“ dient Technologieexperten aus verschiedenen Teildisziplinen der Mechatronik, Additiven Fertigung, Antriebstechnik sowie Industrie- und Seilrobotik als Plattform für einen aktiven Austausch. Nachdem das Lageregelseminar 2021 nach langjähriger Pause erneut guten Zuspruch fand und Vertreter von Firmen wie Festo, Nabtesco und Wittenstein Einblicke in aktuelle Forschungsthemen ermöglichten, wird im Jahr 2023 eine weitere Auflage am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) angeboten. Auf der zweitägigen Veranstaltung geben Referenten aus Industrie und Wissenschaft in Fachvorträgen einen Einblick in aktuelle Forschungs- und Entwicklungsthemen. Dabei werden am 12. und 13. September zwei Keynotes und insgesamt 6 Sessions zu den jeweiligen Teildisziplinen mit je einem Vortrag aus der Forschung und einem aus der Industrie angeboten und folgende Fragestellungen diskutiert:

- **Industrie- und Seilrobotik:** Welche innovativen Methoden existieren, um die Genauigkeit und Dynamik von Robotern zu steigern? Wie kann der Automatisierungsgrad von Produktionsprozessen durch die Robotik erhöht werden?
- **Antriebs- und Maschinentechnik:** Mittels welcher konstruktiver, regelungstechnischer und aktorischer Methoden können hochleistungsfähige Antriebssysteme entwickelt und dadurch die Produktivität und Bearbeitungsqualität von Werkzeugmaschinen verbessert werden?
- **Additive Fertigung:** Welche Chancen entstehen durch die Nutzung der Additiven Fertigung in der Produktion?
- **Industrie-Experten:** Für weiterführende Diskussionen bieten Pausen und eine gemeinsame Abendveranstaltung ausreichend Gelegenheit, sich mit anderen Experten aus der Branche auszutauschen und das persönliche Netzwerk um spannende Kontakte zu erweitern.

Mehr Informationen finden Sie unter:
**www.lageregelseminar-stuttgart.de**

Organisator ISW

Veranstalter FISW

## STUTTGARTER INNOVATIONSTAGE

### TRENDS UND INNOVATIONEN RUND UM DAS THEMA STEUERUNGSTECHNIK UND DIGITALISIERUNG

**Die Stuttgarter Innovationstage sind eine jährlich stattfindende Veranstaltung, die den wissenschaftlichen Austausch und das Networking zwischen Forschung und Industrie fördert. Experten aus unterschiedlichen Kompetenzfeldern referieren zu aktuellen Themen und Lösungen für die Herausforderungen der vierten industriellen Revolution, insbesondere im Kontext der Digitalisierung und Virtualisierung von Steuerungstechnik und Produktionsanlagen.**

Stuttgarter Innovationstage 2023 in der Alten Reithalle, Maritim Hotel Stuttgart.

Die Stuttgarter Innovationstage wurden erstmals im Jahr 2017 als Abschlussveranstaltung des Forschungsprojekts pICASSO (www.projekt-picasso.de) ins Leben gerufen. Das Projekt konzentrierte sich über einen Zeitraum von drei Jahren auf die Umsetzbarkeit von Cloud-basierten Steuerungsmechanismen in der Industrie.
Ursprünglich als eine einmalige Veranstaltung geplant, wurden mittlerweile fünf weitere Veranstaltungen im Rahmen der Innovationstage erfolgreich durchgeführt. Der Initiator des Fachkongresses ist das ISW von der Universität Stuttgart, das als eine der führenden universitären Einrichtungen für Steuerungstechnik im deutschen Maschinenbau bekannt ist. Jedes Jahr präsentieren die Innovationstage den Teilnehmern ein breites Spektrum an aktuellen Themen und Entwicklungen, mit denen sich Maschinenbauer und OEMs im Zuge der Digitalisierung auseinandersetzen müssen. Darüber hinaus sollen die Stuttgarter Innovationstage den Austausch zwischen Forschung und Industrie fördern, um interdisziplinäre Lösungen und Ideen zu inspirieren. Ein Rundgang durch die ISW-Maschinenhalle mit zahlreichen Demonstratoren gewährt den Teilnehmern außerdem tiefe Einblicke in verschiedene Forschungsprojekte und neue Innovationen. Besonders hervorzuheben ist hierbei die Stuttgarter Maschinenfabrik, die am ISW projektübergreifend entwickelt wurde und unsere Lösung auf die Frage: „Wie sieht die Industrie 4.0 Fabrik der Zukunft aus?“ darstellt.

Im Laufe der vergangenen Veranstaltungen wurden viele innovative Themen wie Blockchain, IT-Sicherheit, künstliche Intelligenz, konvergente Netze, Konnektivität, digitales Engineering und Software-defined Manufacturing beleuchtet und ihre Relevanz für den Maschinenbau aufgezeigt. Bei den 6. Stuttgarter Innovationstagen am 28. Februar und 01. März 2023 lag der Fokus auf den Themen digitaler Zwilling und KI-Dienste mit Mehrwert. Damit wurde auch berücksichtigt, dass die Software und ihre Entwicklung einer der entscheidenden Hebel der vierten industriellen Revolution sind.

Die 7. Stuttgarter Innovationstage werden am 17. und 18. September 2024 erneut in der Reithalle des Maritim in Stuttgart abgehalten. Diese Veranstaltung fungiert als Schnittstelle und Networking-Plattform zwischen Forschung und Industrie. Im Mittelpunkt der Veranstaltung steht diese Jahr das zentrale Thema SDM (Software-defined Manufacturing) und dient gleichzeitig als Abschlussveranstaltung für das Verbundvorhaben SDM4FZI (https://www.sdm4fzi.de), das sich mit der Digitalisierung der Fabrik in der Fahrzeug- und Zulieferindustrie befasst.

Die nächsten Stuttgarter Innovationstage finden statt vom **17. - 18. September 2024.**

Weitere Informationen zur nächsten Veranstaltung finden Sie unter: **www.stuttgarter-innovationstage.de.**





## TSN-TESTBED

### INTEROPERABILITÄT FÜR TSN-BASIERTE AUTOMATISIERUNGSGERÄTE

**Time-Sensitive Networking (TSN) hat in der Industrie bereits eine breite Anerkennung als Enabling-Technologie für die Produktion der Zukunft gefunden. Entscheidende Voraussetzung hierfür ist die Interoperabilität zwischen Geräten verschiedener Hersteller. Um parallelen Entwicklungen und verschiedenen Interpretationen der Standards vorzubeugen, gibt es ein großes Interesse an einem möglichst frühen Testen verschiedener Geräte in einem gemeinsamen Netz. Den entsprechenden Rahmen hierfür bietet das TSN-Testbed des IICs, welches vom ISW gehostet und betreut wird.**

TSN Testbed Demonstrator am ISW.

IIC TSN Testbed Plugfest 2023 am ISW.

Ziel des TSN-Testbeds des Industrial Internet Consortiums (IIC) ist es, Hersteller von TSN-Produkten dabei zu unterstützen, diese zu Testen und dadurch Interoperabilität sicherzustellen. Gleichzeitig soll die TSN-Technologie insgesamt voran gebracht werden und eine Akzeptanz am Markt geschaffen werden. Das Testbed, welches derzeit ca. 35 Firmenmitglieder hat, verfügt neben der Instanz am ISW über eine weitere in Nordamerika.

Das Testbed unterstützt die Teilnehmer mittels verschiedener Aktivitäten:

- **Plugfeste:** Drei Plugfeste werden jährlich durchgeführt, bei welchen mehrere Tage lang Geräte gegeneinander und gegen Testequipment getestet werden. Seit Gründung des Testbeds fanden bereits 24 Plugfeste statt.

- **Interoperability Rack:** Um ein kontinuierliches Testen zu ermöglichen, sei es für Langzeituntersuchungen oder für Softwareupdates zwischen den Plugfesten, wird ein Testrack im Dauerbetrieb betrieben. Hersteller können ihre Geräte integrieren und anschließend auf diese über einen Remote-Zugang zugreifen. Um die Analyse zu unterstützen verfügt das Rack über verschiedene Test-Tools und Features wie beispielsweise eine Puls-Per-Second-Messung zur Überwachung der Zeitsynchronisation.

- **Demonstratoren:** Neben den Testaspekten ist das Marketing eine weitere Aufgabe des Testbeds. Hierzu werden gemeinsame Demonstratoren aufgebaut, welche auf einschlägigen Fachmessen ausgestellt werden. Zentrale Botschaft ist hierbei die Interoperabilität von Geräten verschiedener Hersteller.

Bei Interesse steht Ihnen Herr **Florian Frick** gerne zur Verfügung. Weitere Informationen finden Sie auch unter **https://www.iiconsortium.org/time-sensitive-networks.htm.**

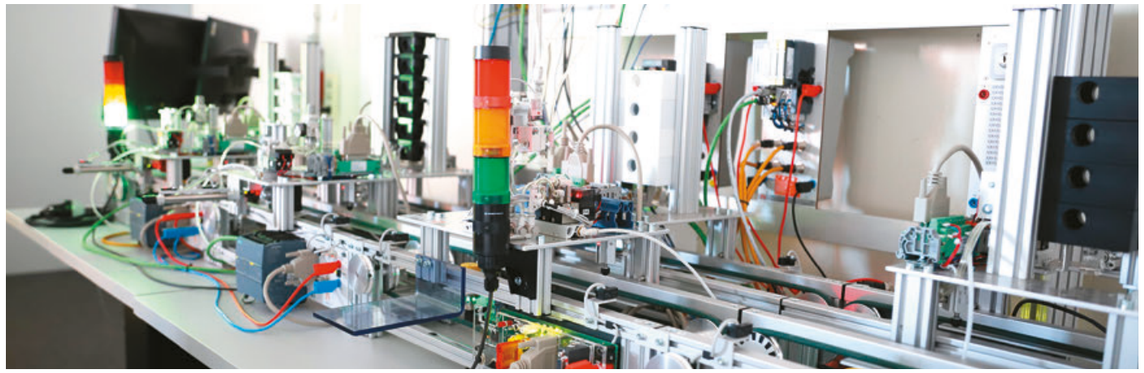
**Kontakt:**
Dipl.-Ing. Florian Frick
florian.frick@isw.uni-stuttgart.de

# LEHRE

## LERNEN AM MODELL

### PRAXISNAHE AUSBILDUNG IN AUTOMATISIERUNGSTECHNIK UND IT

**Am ISW wird seit Oktober 2017 verstärkt auf die Integration bzw. das Zusammenwachsen von Produktions- und Office-IT gesetzt. Insbesondere durch die Entwicklungen im Kontext von Industrie 4.0 und den daraus resultierenden interdisziplinären Fragestellungen wurde das studentische Applikationslabor zur Erforschung und Ausbildung dieser Themen geschaffen.**



Der modulare Aufbau der Anlagen ermöglicht eine universelle Nutzung während den Veranstaltungen

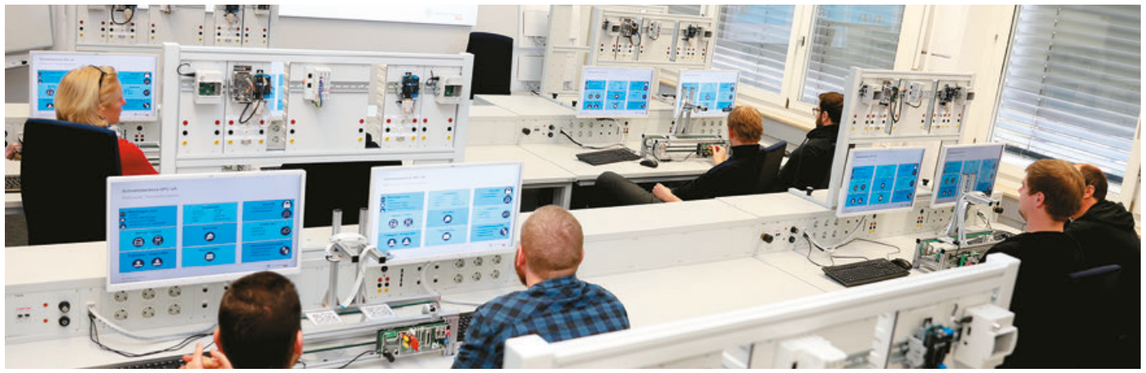
Das ISW forscht international an aktuellen Aufgaben der immer bedeutender werdenden Verzahnung von Maschinen und Software-Technik, die in der Steuerungs- und Automatisierungstechnik auch in Industrieprojekten immer mehr zum Tragen kommt. Als Institut der Universität Stuttgart gehören jedoch auch Beiträge zur Lehre zum Aufgabenbereich. Vertiefungen gibt es zur NC-Technologie, Robotik, Medizintechnik sowie diverse Praktika zu Ölhydraulik und Pneumatik, Handhabungstechnik und Kommunikationstechnik. Zudem sind seit dem Sommersemester 2017 Themengebiete der Digitalisierung in der Produktion durch die Vorlesungen „Produktionstechnische Informationstechnologien", „IT-Architekturen in der Produktion", „Simulationsgestützte Planung und Auslegung von Produktionsanalagen" sowie „Data Science in der Produktion" zum Lehrportfolio des ISW hinzugekommen.

**Verzahnung von Theorie und Praxis**

Die theoretischen Anteile der Vorlesungen werden von praktischen Übungen begleitet, die an realen Anlagen und Anwendungsfällen im institutseigenen Applikationslabor durchgeführt werden. Die Räumlichkeiten des Labors waren zuvor ein PC-Pool, ergänzt durch einige Projektarbeitsplätze zur Bearbeitung studentischer Arbeiten oder zur Realisierung von Projektergebnissen. Anfang 2018 wurden die neuen Laborräume mit 22 Arbeitsplätzen eröffnet. Der Fokus lag auf einem möglichst modularen Aufbau mit universeller Nutzung hinsichtlich der durchzuführenden Veranstaltungen. So gibt es nun 22 Laborarbeitsplätze, die jeweils mit Spannungsversorgung, Netzteilen, Sicherheitstechnik und Netzwerktechnik ausgestattet sind. Im gesamten Labor ist ein doppelter Boden verlegt, durch den alle Versorgungs- und Datenleitungen zu modularen Bodentanks geführt werden. So ergibt sich die Möglichkeit, die Anzahl der Laborarbeitsplätze anzupassen oder gegebenenfalls eine andere Raumbelegung und Raumaufteilung zu schaffen. Die Leitungen führen in einen dem Labor zugehörigen Serverraum und sind an eine Netzwerkinfrastruktur angeschlossen. Durch diese Option ist es möglich, einzelne Arbeitsplätze in einer beliebigen Netzwerktopologie zu verbinden und durch die Switche zu routen. Es können somit praxis- und industrienahe Netzwerkszenarien einer komplexen Produktionsumgebung dargestellt und untersucht werden.

Zudem ist eine rund vier Quadratmeter große Modellanlage in Form einer modernen werkstückträgerbasierten Montageanlage im Applikationslabor installiert. Auf dieser werden Werkstücke in acht verschiedenen Kombinationen montiert und qualifiziert. Die Ansteuerung dieser Anlage basiert auf Industriekomponenten. CPUs, Buskoppler, RFID-Leser, Sensoren und Smart-Kameras sind hier bewusst als Industriekomponenten ausgeführt. Die Werkstückträger sind mit am ISW entwickelten Mikrocontroller-Boards ausgestattet, welche Umgebungsdaten speichern und über WLAN an eine Datenbank senden. Die übergeordnete Verwaltung übernimmt ein ERP-System, das einen Webshop zur Verfügung stellt, indem die Bauteile von den Studierenden exemplarisch bestellt werden können. Durch diese modular erweiterbare Anlage, die teilweise auch wiederum als Grundlage für die studentischen Übungen herangezogen wird, ergeben sich über die festen Übungstermine hinaus Möglichkeiten zur Durchführung von Studienarbeiten, zur Erweiterung der Anlage.

Um Vorlesungen vorzubereiten und neue Techniken für die Übungen bereitzustellen ist dem Labor ein Vorbereitungsraum angegliedert, der in identischem Umfang, jedoch mit reduzierter Anzahl an Arbeitsplätzen wie das Labor selbst, ausgestattet ist.



Mit vernetzten Arbeitsplätzen können komplexe Produktionsbedingungen simuliert werden

**Übungen mit Realbezug**

Die vorlesungsbegleitenden Übungen behandeln Hard- und Software in der Automatisierungstechnik, Co-Simulation und Visualisierung sowie Cloud- bzw. Data Science-Anwendungen. Dabei weisen alle Übungen einen hohen Praxisanteil auf, in dem die Studierenden Problemstellungen aus der Praxis mit industrieller Soft- und Hardware, eingebettet in praktische Beispielsszenarien, eigenständig bearbeiten können.

In den Übungen zur Data Science Vorlesung werden unter anderem die intelligenten Werkstückträger der Modellanlage verwendet, um über diverse Sensorik Daten der Anlage auszuwerten und im Übungskontext zu visualisieren und zu interpretieren.

Die Modellanlage wurde zudem virtuell als Hardware-in-the-Loop-Simulation umgesetzt. Hierfür wurden die CAD-Daten in eine Simulationsumgebung importiert und können jetzt mit der realen Steuerung verbunden und automatisiert werden. Diese Inbetriebnahme- und Visualisierungsmöglichkeit wird ebenfalls in einer bereits bestehenden Übung für Studierende abgebildet.

**Fazit und Ausblick**

Eine Erweiterung der Labornutzung stellt die betriebliche Aus- und Weiterbildung dar. In diesem Zusammenhang besteht bereits die Möglichkeit, interessierte Fachkräfte oder Berufseinsteiger in Themen, wie z.B. die praxisnahe Einführung in OPC UA sowie technisch tiefere Einführungen zum Themenbereich „Produktionstechnische Informationstechnologien", zu schulen. Ziel ist dabei, ein Verständnis für IT in der Produktion zu vermitteln und allen Teilnehmenden die Möglichkeit zu bieten, IT in der Produktion in einem sicheren Umfeld an Modellanlagen, selbst anzuwenden.

Die Rückmeldungen von Studierenden und Projektpartnern sind durchweg positiv und werden häufig durch Diskussionen zur weiteren Nutzung und dem möglichen Mehrwert für die universitäre Ausbildung, aber auch zur industriellen Fort- und Weiterbildung, ergänzt.

**Kontakt:**
Georg Ziegler
georg.ziegler@isw.uni-stuttgart.de

## VORLESUNGEN, ÜBUNGEN, PRAKTIKA UND KURSE

**Das Institut ist in die Fakultät 7 „Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik“ der Universität Stuttgart integriert und arbeitet in der Forschung schwerpunktmäßig in der Konzeption und Anwendung steuerungstechnischer Mittel zur Automatisierung von Werkzeugmaschinen, Robotern und anderen Produktionseinrichtungen. Im Vordergrund der Arbeiten stehen dabei die Konzeption und Entwicklung von Planungssystemen und Engineeringmethoden, die echtzeitfähige Simulation von Produktions- und Materialflusssystemen, die Konzeption neuartiger, auch cloudbasierter Steuerungsarchitekturen und industrielle Kommunikations-, Antriebs-, Mess- und Regelungstechnik. Der für Studierende daraus abgeleitete Vorlesungsstoff vermittelt die aktuellen, praxisnahen Grundlagen für die industrielle Automatisierungstechnik und ist nicht nur auf Werkzeugmaschinen und Industrieroboter bezogen.**

Studierende in der Maschinenhalle des ISW

Wir legen großen Wert auf die praxisgerechte Erprobung der Ergebnisse. Diese fließen in die Lehre, aber auch in Kurse und Seminare für Ingenieurinnen und Ingenieure aus der Praxis ein. Arbeiten im Rahmen von Industrieprojekten bieten für Sie zudem die Möglichkeit, sich durch persönliche Eindrücke und Kontakte auf ihre zukünftigen Aufgaben besser vorzubereiten.
Haben Sie vor, eine bestimmte Zeit im Ausland zu studieren? Wir haben umfangreiche Kontakte zu Forschungseinrichtungen weltweit und können Sie dabei unterstützen, einen erfolgreichen und zielführenden Auslandsaufenthalt in Ihr Studium zu integrieren.
Das ISW bietet ein umfangreiches Vorlesungs- und Praktikumsangebot in den Bereichen Steuerungs-, Antriebs-, Simulations- und Robotertechnik. Dieses Angebot wurde im letzten Jahr um Vorlesungen mit integrierten Übungen zur Modellierung softwareintensiver Systeme erweitert. Studierende des Maschinenbaus, der Mechatronik, der Technischen Kybernetik, der Elektrotechnik und Informatik, aber auch des Technologiemanagements und der technisch orientierten Betriebswirtschaftslehre besuchen diese Veranstaltungen.
Praktika bieten den Studierenden Einblicke und Erfahrungen an realen Maschinen und Anlagen, um das in den Vorlesungen vermittelte Wissen zu vertiefen. Dies umfasst beispielsweise die Programmierung von SPS, die Modellierungstechniken der UML (Unified Modeling Language), das Programmieren von Werkzeugmaschinen und Industrierobotern oder die Einstellung von Achsreglern an Vorschubachsen.
Leider hat die Studierendenzahl an der Universität Stuttgart und damit auch am ISW abgenommen. Im Bereich der studentischen Arbeiten (Studien-, Bachelor-, und Masterarbeiten) ist dieser Rückgang zunehmend spürbar und insbesondere beim Besetzen von Stellen für wissenschaftliche Hilfskraft mittlerweile gravierend. Das ISW versucht durch Werbemaßnahmen und frühe Bindung von Studierenden (ISWAcademy) entgegenzuwirken.

**Vom ISW angebotene Vorlesungen**

| Vorlesung | SS 20 | WS 20/21 | SS 21 | WS 21/22 | SS 22 | WS 22/23 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Steuerungstechnik mit Antriebstechnik (Verl) | – | 280 | – | 280 | | 250 |
| Zusätzliche Übungen zur Steuerungstechnik (Seyfarth) | – | 180 | – | 150 | | 150 |
| Steuerungsarchitekturen und Kommunikationstechnik (Verl / Lechler) | – | 15 | – | 12 | – | 8 |
| Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Industrieroboter (Verl) | 100 | – | 100 | – | 90 | – |
| Angewandte Regelungstechnik in Produktionsanlagen (Verl) | 15 | – | 15 | – | 12 | – |
| Produktionstechnische Informationstechnologien (Riedel) | 65 | – | 60 | – | 60 | – |
| IT-Architekturen in der Produktion (Riedel) | – | 50 | – | 40 | – | 35 |
| Simulationsgestützte Planung und Auslegung von Produktionsanlagen (Riedel) | 8 | – | 6 | – | 6 | – |
| Data Science in der Produktion (Riedel) | – | 12 | – | 10 | – | 6 |
| Modellierung software-intensiver Systeme (Wortmann) | – | – | – | 2 | 3 | 5 |
| Modellierung, Analyse und Entwurf neuer Roboterkinematiken I / II (Pott) | 8 | 8 | 6 | 6 | 5 | 5 |
| Robotersysteme – Anwendungen aus Industrie und Servicerobotik (Koeppe) | 20 | – | 20 | – | 16 | – |
| Robotersysteme – Anwendungen aus der Servicerobotik (Bormann) | – | 40 | – | 50 | – | 50 |
| Planung von Robotersystemen (Kraus) | – | 10 | – | 7 | – | 5 |
| Ölhydraulik und Pneumatik in der Steuerungstechnik (Seyfarth) | 20 | – | 15 | – | 10 | – |
| Automatisierung in der Montage- und Handhabungstechnik (Wolf) | 30 | – | 30 | – | 25 | – |
| Grundlagen der Bionik (Schwarz) | 20 | – | 20 | – | 20 | – |
| Mechatronische Systeme in der Medizin – Anwendungen aus der Rehabilitation und Orthopädie (Schneider) | – | 30 | – | 20 | – | 20 |
| Steuerungstechnisches Praktikum (Verl / Riedel / Lechler / Seyfarth) | 20 | 40 | 20 | 40 | 25 | 35 |
| APMB (Allg. Praktikum Maschinenbau) (Verl / Riedel / Lechler / Seyfarth) | 35 | 35 | 40 | 25 | 30 | 25 |
| C/C++ Kurs (Seyfarth) | 18 | 15 | 17 | 15 | 14 | 16 |

**Kontakt:**
Dipl.-Ing. Michael Seyfarth
michael.seyfarth@isw.uni-stuttgart.de

## ABGESCHLOSSENE STUDENTISCHE ARBEITEN

**Eine wertvolle Bereicherung für die Arbeiten des Instituts sind die zahlreichen studentischen Arbeiten. Die Studierenden können dabei hautnah die aktuellen Forschungen der wissenschaftlichen Mitarbeiter unterstützen. Auf Grund der vielfältigen Einbindung des ISWs in unterschiedliche Studiengänge kommen Studierende des Maschinenbaus, der Automatisierungstechnik, der Mechatronik und Technischen Kybernetik aus verschiedenen Semestern zu Studienarbeiten (SA), Bachelorarbeiten (BA) und Masterarbeiten (MA) an das ISW. Die hohe Anzahl an abgeschlossenen Arbeiten zeigt, dass das Institut interessante und innovative Angebote an die Studierenden macht, die von diesen geschätzt und mit großem Engagement umgesetzt werden.**

### 2022

**Li, Xu**
Anforderungen der vernetzten Fabrik an die industrielle, echtzeitfähige Kommunikation

**Hameni, Emmanuel**
Analyse von Testmöglichkeiten auf Basis von OPC UA Companion Specifications am Beispiel der OPC UA for Flat Glass Processing

**Hameni, Emmanuel**
Entwurf und Realisierung einer dienstbasierten Datenaggregation für die Nutzung von Steuerungsdaten in der Verwaltungsschale

**Ulken, Henning**
Analyse von Hardware und Software zur Eignung als intelligente Steuerung in Kleinproduktionsstätten afrikanischer Entwicklungsländer

**Bakovic, Aleksandar**
Durchführung einer empirischen Studie zu Cloud Manufacturing Plattformen im Bereich CNC

**Ajdinovic, Samed**
Umsetzung und Evaluation unterschiedlicher Prozessvisualisierungsmethoden für einen Industrie 4.0 Anwendungsfall

**Deuschle, Felix**
Erstellung eines Konzepts zur Entwicklung von OPC UA Companion Specifications anhand von DevOps

**Jainczyk, Alexander**
Analyse quantenspezifischer Anwendungsfälle und Problemlösungsverfahren im Bereich des Maschinenbaus

**Salteris, Yannis**
Optimization of dynamic contact simulation of robotic processes in MuJoCo using machine learning methods

**Wang, Weibo**
Konzeption und Realisierung einer autarken CAD/CAM-Analyse-Kette im Kontext des Cloud-Manufacturing

**Özkaya, Oguzhan**
Analyse und Konzept zur Verschlüsselung von Echtzeitkommunikation

**Erkoc, Osman**
Konzeption und Konstruktion einer Produktionsanlage für maßgefertigte Fahrradgriffe

**Behling, Merlin**
Entwicklung und Umsetzung einer modellbasierten Steuerung zum automatisierten Mischen und Befüllen von Silikon

**Lempa, Matthias**
Charakterisierung und Ableitungsanforderung hinsichtlich der automatisieren (De)montage von Brennstoffzellensystemen/Elektrolyseursystemen

**Haslach, Lenz**
Konzeption, Konstruktion und Validierung eines funktionsintegrierten Saugnapfgreifers für KI-basiertes Bin-Picking

**Sponner, Carsten**
Konzeption, Konstruktion und Validierung einer Roboterzelle für KI-basiertes Bin-Picking

**Younes, Islam**
Durchführung einer empirischen Studie zu Cloud Manufacturing Plattformen im Bereich 3D-Druck

**Marquart, Matthias**
Entwicklung eines Prognosemodells für den Kistenfüllstand von Blechteilen

**Rühle, Sophie**
Konzeption und Umsetzung eines CAM-Werkzeugs für die additive Fertigung von optischen Linsen unter Verwendung eines Zwei-Photonen-Polymerisationsprozesses mit fünfachsigem Positioniersystem

**Ulrich, Robin**
Untersuchung von Möglichkeiten zur Auslegung eines haptischen Feedbacks eines Tischfußballspiels

**Jud, Oliver**
Konzeption passiver Mechanismen zur definierten Nachstellung der Vorspannkraft bei Kugelgewindetrieben

**Malzoni, Adriano**
Entwicklung eines Verfahrens zur Online-Höhenmessung im FFF-Prozess

**Potapenja, Vanessa**
Simulative Untersuchung von Möglichkeiten zur Auslegung eines haptischen Feedbacks eines Tischfußballspiels

**Clar, Johannes**
Markerbasierte Lokalisierung und Bahnanpassung für das Faserwickeln mit Robotern in ROS

**Kamm, Valentin**
Prozessadaptive Regelung zur Genauigkeitssteigerung der roboterbasierten Fertigung

**Hätinger, Louis**
Konzeption und Realisierung einer CAD/CAM-Kette für die verteilte Produktion von 3D-Druck-Aufträgen innerhalb einer Cloud-Manufacturing-Plattform

**Kiris, Sinan**
Steuerung und Simulation eines fahrerlosen Transportsystems für das Bauteilhandling in der Vorfertigung von Holzbauteilen

**Weiß, Christopher**
Konzeption einer Steuerungsarchitektur für das pneumatische In-Prozess-Messen während des Langhubhonens auf Bearbeitungszentren

**Peschel, Kjell**
5-Achs-Überschleifen an Flächengrenzen

**Riedel, Patrick**
Sensorlose Hysteresekompensation von Robotergelenken mit Zykloidgetrieben

**Bunoza, Ivo**
Entwicklung und Umsetzung eines kompakten Druckkopfes für die mehrachsige additive Fertigung

**Strähle, Julian**
Mechatronische Simulation zur Beurteilung und Optimierung des dynamischen Verhaltens einer 5-Achs-Lasermaschine

**Bobe, Eva**
Erlernen eines Simulators für Materialflussmodelle mithilfe von Graph Neural Networks auf Basis von Daten einer Physik-Engine

**Pazmino, Ricardo**
Autonome Getränkelogistik mit Robotern

**Liu, Chang**
Modellierung einer betriebsbegleitenden Simulation eines Laser-Prozesses

**Leipe, Valentin**
Echtzeitfähige, modellprädiktive Regelung für Kugelgewindetriebe

**Stiebing, Janik**
Gestaltung und Evaluierung einer Vorgehensweise zur Entwicklung einer Leitsteuerung eines fahrerlosen Transportsystems in der Intralogistik

**Liu, Bingxi**
Automatische Layout Planung rekonfigurierbarer Fertigungssysteme auf Basis von AutomationML

**Yang, Yanshen**
Entwurf eines Partitionierungsverfahrens für Simulationsmodelle von digitalen Zwillingen

**Gerlach, Jenin**
Entwicklung einer Steuerung mit Höhenregelung für das roboterbasierte FFF 3D-Druck-Verfahren

**Zhu, Hongyi**
Machine vision in ROS for handling tasks with low cost robots

**Chaibi, Sana**
Systematische Literaturrecherche über die Architektur- und Datenmodelle von Cloud Manufacturing Plattformen

**Heer, Silas**
Machbarkeitsanalyse einer virtuellen Inbetriebnahme von Roboteranlagen mit Kamerasystemen zur Positionserkennung von Bauteilen

**Lotz, Julius**
Entwicklung und Konstruktion eines modularen Drucksystems für die Herstellung von zementlosen Betonelementen mittels mikrobiologisch induzierter Calzitausfällung

**Böhringer, Tobias**
Entwicklung einer Schnittstelle zur Anbindung von KUKA-Robotern an ROS2

**Roock, Konstantin**
Design und Validierung eines Konzepts zur Verifikation von spezifischen Schutzmaßnahmen bei der Mensch-Roboter-Kollaboration

**Benz, Alexander**
Untersuchungen zum Trennen von Kabeln als Teilprozess der robotergestützten Demontage von Batteriemodulen

**Jia, Fuming**
Vergleich modellbasierter Regelverfahren zur Trajektorienfolgeregelung am Kugelgewindetrieb

**Baier, Michael**
Echtzeitanalyse und Konzeption eines Modellierungsworkflows für die Partikelsimulation bei der virtuellen Inbetriebnahme

**Baur, Markus**
Verteilte Flottenverwaltung mobiler Roboter in instabilen Netzwerken

**Mayer, Philip**
Systemsimulation für den digitalen Zwilling einer Umformpresse

**Schneider, Lucas**
Modellierung des dynamischen Verhaltens von elektrisch verspannten Zahnstange-Ritzel-Antrieben

**Schneider, Benedikt**
Konzeption eines durchflussgeregelten Verteilsystems für die Betonfertigteilindustrie

**Schaffert, Johannes**
Entwicklung und Bewertung von Maschinenkonzepten für das 5-achsige direkte Bedrucken von thermogeformten Bauteilen

**Haug, Maximilian**
Reinforcement Learning Ansatz für die Automatisierung der robotergestützten Katheterisierung

**Euchner, Vincent**
Reinforcement Learning in Verbindung mit einer TwinCAT-Steuerung

**Fischinger, Lukas**
Analyse von Materialflusssimulationen bezogen auf die virtuelle Inbetriebnahme

**Fazelalyan, Mehran**
Adaptive Diskretisierung und Strukturierung topologieoptimierter LLM-Bauteile

**Wellbrock, Julian**
Ausrichtung und Vergleich von 3D-Geometriemodellen für die automatische Planung subtraktiver Bearbeitungsprozesse unter Beachtung der Bauteiltoleranzen

**Siebert, Christian**
Modellierung von Getrieben für die Reglerauslegung in der Industrierobotik

**Bär, Nico**
Konzeption und Umsetzung einer lernenden Vorsteuerung für laserbasierte Pulverbettverfahren

**Gai, Xifan**
Konzeption und Implementierung eines Lernalgorithmus für die Konfiguration von Katheterwerkzeugen

**Koc, Emre Can**
Automatisierte 3D-Modell- und Simulationsentwicklung für Robotermontagezellen

**Lippold, Sebastian**
Konzeption einer Roboter-basierten Fertigung von Modulen für den Fertighausbau

**Denkinger, Markus**
Konzeption und Implementierung eines Systems zum automatischen Starten einer VIBN-Testumgebung zur Qualitätssicherung von Simulationssystemen

**Heymann, Alexander**
Entwicklung und Inbetriebnahme einer Steuerung mit Prozessregelung für das roboterbasierte WAAM 3D-Druck-Verfahren

**Weiss, Manuel**
Systemarchitektur und prototypische Umsetzung einer Werkzeugmaschine mit adaptiver PWM

**Gebele, Lukas**
Automatisierte Datenaufbereitung und Feature-Engineering der zustandsabhängigen Gleichlauffehler von Zahnstange-Ritzel-Antrieben

**Göhner, Tim**
Simulation des robotergestützten Fertigungsprozesses von Holzbauteilen





**Rustom, Nizar**
Implementierung eines Bedienkonzepts für die Low-Cost-Robotik

**Maier, Vinzent**
Berechnungsmethode zur Bestimmung von Bahnvolumen für die mehrachsige additive Fertigung mit lokal variabler Schichthöhe

**Xu, Ruihan**
Automatisiertes Metallgießen: Erforschung des digitalen Zwillings eines Gießroboters

**Wieder, Benjamin**
Reinforcement Learning in Verbindung mit einer TwinCAT Steuerung

**Stuhlberg, Felix**
Aufbau einer Pipeline für die simulationsbasierte Steuerungsentwicklung

**Bledig, Nico**
Betriebsbegleitende Simulation für digitale Zwillinge von Produktionssystemen

**Schaffert, Johannes**
Entwicklung eines digitalen Zwillings für das reale Verhalten eines Achsverbunds

**Chen, Siyu**
Maschinelles Lernen für modellfreies Greifen in Robotik-Anwendungen

**Klein, Sebastian**
Bahnplanung für das Fräsen von parametrischen Holzbauteilen mit Industrierobotern

**Mommer, Felix**
Kamerabasierte Steuerung von fahrerlosen Transportsystemen zur hochgenauen Positionierung von großformatigen Holzbauteilen

**Rempel, Rudolf**
Weiterentwicklung und Optimierung einer Kinematik zur Beikrautregulierung für mobile Roboter in der Landwirtschaft

**Wetzel, Jürgen**
Entwicklung eines digitalen Zwillings für rekonfigurierbare Roboteranlagen in Unity

**Alsadi, Abouzar**
Vergleich von Reinforcement-Learning-Agenten mit klassischen regelungstechnischen Verfahren

**Blattert, Leon**
Entwicklung eines Systemtests mit Testumgebung zur Verifikation eines mechatronischen Systems

**Helmstaedt, Katharina**
Automatische Generierung einer digitalen Montageanleitung als Webanwendung

**Zhang, Wenye**
Konzeption und Implementierung von dynamischen Steuerungseingängen für das makroskopische Flussmodell

**Gehringer, Jan**
Entwicklung und Absicherung eines Konzpets für die automatische Hydraulikleitungsproduktion

**Xu, Haijia**
Modellauswahl und Offline-Parameteridentifikation der Mechanik am Kugelgewindetrieb

**Faigle, Benjamin**
Optimierung und Erweiterung eines bestehenden Deep Reinforcement Learning Ansatzes zur automatisierten Enthakung von Werkstücken in einer realen Griff-in-die-Kiste Applikation

**Haake, Matthias**
Reinforcement Learning zum Erlernen einer Steuerung für einen Ball-and-Plate Labyrinth Anwendungsfall am realen Aufbau

**Schmitt, Moritz**
Entwicklung von KI-basierten Registrierungsalgorithmen für biegeschlaffe Bauteile mit automatisierter Trainingssetgenerierung

**Zand, Amirshayan**
Untersuchung von Graph Neural Networks zum Erlernen von Umformsimulationen

**Erb, Florian**
Modellierungssprachen in der Automobilindustrie

**Balbach, Daniel**
Experimentelle Untersuchung der Kombination von Case-Based Reasoning mit neuronalen Netzen

**Schwientek, Tobias**
Integration von industrieller Simulationstechnik in eine Digitale-Zwilling-Architektur

**Vu, Cao Tu**
Entwurf einer Modellierungssprache für die simulationsbasierte Steuerungsentwicklung

**Krumm, David**
Implementierung eines digitalen Zwillings mittels OPC-UA

**Navale, Kanishk**
SLOG: Single Label Object Grasping

**Fritz, Ann-Kathrin**
Entwurf eines selbstadaptiven digitalen Zwillings auf Grundlage des Software- und Hardware-in-the-Loop-Konzepts zur Verbesserung von Prozessqualitäten

## 2021

**Gessner, Gernot**
Entwicklung und Evaluation einer Echtzeit-Traffic-Control-API unter Linux

**Geiger, Manuel**
Design und Aufbau eines Lüftungs- und Überwachungssystems für einen Serverraum

**Günes, Can**
Analyse und Definition der Montagekomplexität

**Mertens, Niklas**
Entwicklung eines Konzepts zur dynamischen Bereitstellung von Software-Diensten in Produktionsumgebungen

**Lehner, Jannik**
Architekturen der Echtzeit-Inferenz neuronaler Netze für Soft-SPSen im Anwendungsfall einer bildverarbeitenden Steuerung

**Kilic, Viktor**
Entwicklung von Softwaremetriken für OPC-UA-Informationsmodelle

**Zhu, Hongyi**
Konzept zur Virtualisierung der Echtzeit-Steuerungsumgebung für die Software- und Hardware-in-the-Loop-Simulation

**Saueressig, Simon**
Hochfrequente Ansteuerung von Laserscannern mittels FPGA

**Zheng, Xiang**
Kraftbestimmung deformierbarer Schnappverbindungen in der Starrkörpersimulation

**Holzapfel, Andreas**
Retrofitting einer Werkzeugmaschine mit OPC UA for Machine Tools

**Herrmann, Ron**
Vergleich der Funktionalitäten von Speicherprogrammierbaren Steuerungen und Konzeptentwicklung zur Portierung von Steuerungsprojekten

**Blatter, Benjamin**
Entwicklung einer mehrachsigen Bioprinting-Anlage für künstliche Knorpelgewebe mit prozessorientierter Druckkopfsteuerung

**Nickel, Tim**
Inkrementelles Lernen für die 3D-Objekterkennung basierend auf generischen DL-basierten RGB-D Repräsentationen

**Arslan, Yunus**
Realisierung eines service-orientierten und verteilten Machine-Execution-Systems für die dezentrale Beauftragung von Produktionsmitteln

**Schäfer, Adrian**
Untersuchung von agentenbasierten Methoden zur optimierten mehrachsigen Bahnplanung für das FDM-Verfahren

**Link, Jonathan**
Rotationsmöglichkeiten von biegeschlaffen Werkstücken mit zwei gegenläufigen Fördergurten auf einem Robotergreifer

**Wörner, Jonathan**
Feature-Erkennung für die graphenbasierte Montageproduktgestaltung mittels maschinellen Lernens

**Breidohr, Veronika**
Konzept und Realisierung einer Hardwarefehler-Simulation zur Laufzeit von Testanwendungen

**Froese, Mathias**
Charakterisierung von industrieller Kommunikation

**Zhang, Ziqian**
Umsetzung eines deterministischen, drahtlosen Kommunikationssystems (basierend auf LTE) in einer Simulationsumgebung

**Yang, Yanshen**
Anwendung und Potential von Funktechnologien wie 5G in der industriellen Kommunikationstechnik

**Liu, Bingxi**
Reinforcement Learning der Steuerungsstrategie für die Durchführung von Montageprozessen innerhalb einer Model-in-the-Loop-Simulation

**Bartman, Michael**
Training und Sim-to-Real Transfer eines roboterbasierten Peg-in-Hole Prozesses

**Raymund, Sebastian**
Entwicklung einer Architektur zur hochfrequenten Sensordatenauswertung auf einer FPGA-basierten Hardware-Plattform

**Yan, Sitao**
Konzeption einer immersiven Entwicklungsumgebung zur Simulationsmodellgenerierung

**Yüzüncü, Nadir**
Entwicklung eines verteilten Multi-Agentensystems für die Realisierung von zusammengesetzten cyberphysischen Systemen in der Produktion

**Duell, Simon**
Entwicklung eines föderierten Ansatzes zum bestärkten Erlernen von Einsteckvorgängen

**Schnitzler, Jonathan**
Flexibler Einsatz verschiedener Endeffektoren beim modellbasierten Griff-in-die-Kiste mit Deep Learning

**Amirabbas, Nasser**
Entwicklung eines intelligenten Aktuators für die Reduzierung von Bauteilschwingungen bei der Bearbeitung von Schalenelementen

**Ping, Yiwen**
Potentialanalyse einer closed-loop Quality-Lösung im Bereich der Batteriezellenfertigung für die Automobilindustrie

**Schlenk, Silas**
Modellierung, Entwicklung und Optimierung einer personalisierten Skolioseorthese unter Verwendung eines mehrachsigen additiven Fertigungsverfahrens

**Chaudhry, Asif**
Entwurf einer Online-Datenaustauschplattform für Simulationsmodelle

**Kurniadilvo, Christian**
Erstellung von OPC-UA-Client-Bibliotheken auf Basis der Informationsmodelle von Companion-Spezifiaktionen

**Krammer, Florian**
Mensch-Roboter-Kollaboration - Montageablaufplanung für einen Druckminderer mit einem Leichtbauroboter

**Eisenhardt, Fabian**
Prognostizierung des Verhaltens einer hochskalierten Anlage anhand eines digitalen Zwillings

**Trefz, Steffen**
Experimentelle Validierung eines topologieoptimierten, generativ hergestellten Lagerbockes einer Kugelgewindetrieb-Vorschubachse

**Frischeisen, Kilian**
Konzeption einer immersiven Simulationsumgebung mit kollaborative Bedienbarkeit

**Younes, Islam**
Durchführung einer empirischen Studie zu Cloud Manufacturing Plattformen

**Meitinger, Sophie**
Evaluierung von Process Mining für das Produktionscontrolling im sequenzierten Rohbau

**Stanglmeier, Pirmin**
Entwicklung, Implementierung und Test einer NETCONF-kompatiblen Konfigurationsschnittstelle von DSA-Switches in Linux für die Nutzung mit TSN

**Gihr, Marwin**
Beauftragung von Werkzeugmaschinen über OPC UA

**Richter, Matthias**
Die automatisierte Erstellung von Automatisierungstreibern unter Verwendung von Template-based Code Generation für PLC4X

**Waggershauser, Mario**
Entwicklung einer Methodik für die Implementierung einer datengetriebenen Dienstleistung zur Optimierung der Zustandsdiagnose von Werkzeugmaschinen

**Ehrensperger, Niklas**
Aufbau eines fahrerlosen Transportsystems (FTS) inklusive Leitsteuerung in ROS2 als Anwendungsfall für weitere Forschungsarbeiten

**Yildiz, Ülgen**
Erweiterung eines Experimentierdesigns zur Prototypisierung von KI-Ansätzen in der Produktion und Produktionsplanung

**Steinacker, Daniel**
Test und Verifikation einer TSN Endpunkt-Umsetzung unter Linux

**Mages, Alexander**
Auf dem Weg zum Digitalen Zwilling - Untersuchung und Kompensation zur Diskrepanz zwischen VIBN-Simulationsmodellen und ihren realen Zwillingen

**Allimant, Lukas**
Schweißnahtbewertung unter Verwendung neuroevolutionärer Algorithmen

**Strobel, Tim**
Konzeption einer menschzentrierten Automatisierung für den Holzbau

**Heilmeier, Daniel**
Simulationsbasierter Vergleich verschiedener Methoden des Deep Reinforcement Learning für die Erstellung kraftgeregelter Roboterprogramme für Montageanwendungen

**Nagel, Patrick**
Experimentelle Untersuchung des dynamischen Verhaltens von Robotergelenken mit Zykloidgetrieben

**Neumann, Micha**
Effizienzoptimierung einer Motorregelung für eine fremderregte Synchronmaschine

**Qiguan, Shiqun**
Analyse von Isolationsmechanismen in Steuerungssystemen

**Herczeg, Tobias**
Modellierung und Simulation des anisotropen Materialverhaltens FDM-gedruckter Bauteile

**Krawczyk, Daniel**
Entwicklung eines parametrierbaren Steuergeräts für Düsenventilmodule zur präzisen Dosierung von Flüssigkeiten

**Schwarz, Elmar**
Ansätze zur verbesserten Anwendbarkeit von Reinforcement Learning für Steuerungsstrategien in der Produktionstechnik

**Delonge, Nicolas**
Konzeption und Implementierung eines Tools zur Generierung eines Anlagenabbilds für die virtuelle Inbetriebnahme von Siemens-Steuerungen

**Drescher, Marcel**
Modellierung des dynamischen Materialverhaltens im 3D-Druck und in Klebeanwendungen und Entwicklung einer modellbasierten Vorsteuerung zur echtzeitfähigen CNC-Anwendung

**Klein, Konrad**
Entwicklung einer Systematik zur Konstruktion von additiv gefertigten Robotergreifern und deren Ausgestaltung

**Böhner, Marcel**
Identifikation von Dynamikparametern am Kugelgewindetrieb

**Sobhan-Sarbandi, Janik**
Vergleich von klassischen Regelungsmethoden und Methoden der künstlichen Intelligenz zur Regelung eines pneumatischen Manipulators

**Xu, Anna**
Entwicklung einer Ausführungsumgebung für KI-basierte Mehrwertdienste

**Schanz, Kevin**
Entwicklung einer Regelung für expandierende Trajektorien in der Applikation an kollaborativen Knickarmrobotern

**Krank, Torsten**
Identifikation und Kompensation nichtlinearer Effekte am Kugelgewindetrieb

**Klingel, Lars**
Recherche, Aufbau und Validierung einer betriebsbegleitenden Simulation von Produktionssystemen mittels einer Multi-Core-Architektur

**Baier, Michael**
Erweiterung einer Simulationsumgebung durch ein physikalisches Modell für Objekte mit reduzierter Steifigkeit

**Schneider, Anja**
Genauigkeitssteigerung von Tiefenbildern durch Sensor Fusion mit künstlichen neuronalen Netzen

**Weiß, Christopher**
Realisierung und Bewertung einer virtuellen Entwicklungsumgebung zur testgetriebenen Programmierung einer SPS

**Dietrich, David**
Stabilitätsbetrachtung während der In-Betrieb-Rekonfiguration eines parallelen Seilroboters

**Wenger, Thomas**
Entwicklung und Implementierung einer echtzeitfähigen Robot-Operating-System (ROS)-Schnittstelle für Stäubli Industrieroboter basierend auf EtherCAT und dem standardisierten Antriebsprofil CiA 402

**Knepple, Andre**
Konzeption eines grafischen Nutzerinterface (GUI) für die Prozessmodellierung

**Roffeis, Jonas**
Entwicklung einer ROS2-basierten Steuerung für das robotergeführte Faserwickeln

**Marquart, Daniel**
Identifikation und Reglerselbsteinstellung am Kugelgewindetrieb





**Bauer, Christian**
Regelung eines Gießprozesses

**Zarbali, Emilio**
Implementierung einer räumlich-zeitlichen Hotspoterkennung von Menschen, basierend auf einem semantischen Szenenmodell

**Steidle, Adrian**
Reinforcement Learning der SPS-Logik an der X-in-the-Loop-Simulation einer Produktionsanlage

**Baur, Marius**
Implementierung von identifizierten Unsicherheiten in einer Mehrkörpersimulation zur Validierung eines Reglers für unteraktuierte Mehrkörperketten

**Pfingsten, Jan**
Beobachterentwurf für Roboter mit elastischen Gelenken

**Wetzel, Maren**
Modellierung eines Kugelgewindetriebs mit verteiltparametrischer Kugelrollspindel

**Lopez, Lorena**
Automatische Layout-Planung rekonfigurierbarer Roboteranlagen für die Vorfertigung von Holzbauelementen

**Sauer, Robin**
Pulverbett-basierte additive Fertigung mit variabler Auflösung

**Salerno, Johannes**
Hybride Bahnplanung linienförmiger Werkzeuge für die schichtbasierte additive Fertigung

**Littfinski, Daniel**
Automatische Generierung eines digitalen Zwillings für die Simulation rekonfigurierbarer Fertigungssysteme

**Tschemernjak, Dominik**
Entwicklung und Inbetriebnahme eines Reibkraftaktors zur Schwingungsdämpfung bei Industrierobotern

**Yu, Jian**
Segmentierung verzweigter linear deformierbarer Objekte für Roboterlokalisierung

**Herburger, Klaus**
Erlernen eines Simulators für Materialflussmodelle mithilfe von Graph Neural Networks

**Lempa, Matthias**
Untersuchung und Vergleich verschiedener Programmieransätze zur kraftgeregelten Montage mit Robotern

**Chavarriaga, John Jairo**
Experimentelle Untersuchung des Gleichlaufverhaltens von Zahnstange-Ritzel-Antrieben

**Ba, Zhongyu**
Konzeption und Implementierung einer Lokalisierung von Stückgütern aus dem Flussmodell

**Schwalb, Christian**
Untersuchung zum Einsatz von Methoden des maschinellen Lernens (Inverse-Graphics) für zeichnende Roboter

**Seltsam, Julian**
Empirische Einflussanalyse der Fertigungsparameter auf die Bauteileigenschaften verklebter LLM-Bauteile

**Hsueh, Chung-Heng**
Zeitoptimale Bahnplanung mehrachsiger Bearbeitungsprozesse unter Ausnutzung von Orientierungstoleranzen

**He, Song**
Application of machine learning approaches to disturbance compensation on rack-and-pinion drives

**Puvanenthiran, Janarthan**
Literaturrecherche zur Angriffssicherheit von OPC UA Anwendungen

**Elgeti, Marcel**
Entwicklung des Manipulators eines mobilen Agrarroboters zur mechanischen Beikrautregulierung

**Mei, Yanpeng**
Bahnoptimierung bei der Interpolation in der Numerischen Steuerung

**Liu, Bingxi**
Analyse und Konzeption von Robotern in medizinischen Simulationen

**Rodegast, Philipp**
Implementierung und Bewertung eines Bahnplanungsalgorithmus für die additive Fertigung

**Hagedorn, Marcel**
Weiterentwicklung und Optimierung eines Aktors zur mechanischen, nicht-bodeninvasiven Beikrautregulierung

**Leipe, Valentin**
Vergleich von Methoden zur Zustandsrekonstruktion am Kugelgewindetrieb

**Hielscher, Till**
Entwicklung einer Prozesskette zur Bahngenerierung im mehrachsigen FDM-Druckverfahren

**Heinz, Tobias**
Inbetriebnahme und Integration eines Laserscanners zur roboterbasierten 3D-Registrierung von Objekten

**Werner, Timo**
Optimierungsbasierte Trajektorienplanung auf einem bewegten Horizont für ein redundantes Robotersystem

**Rank, Philipp**
Verbesserte Bahnplanung und Sollwertgenerierung für einen Zusatzaktor

**Höflinger, Andreas**
Generative Layout Planung rekonfigurierbarer Roboteranlagen für die Vorfertigung von Holzbauelementen

**Tepper, Louis Pierre**
Kamerabasiertes Prozess-Monitoring zur Prozessoptimierung für das Schalungsdrucken mittels Binder-Jetting-Verfahren

**Mattheis, Finn**
Konzeption und Gestaltung einer mobilen Roboterkinematik mit Aufwälzgreifer zur automatisierten Kommissionierung

**Wang, Yifeng**
Automatisierte Hand-Auge-Kalibrierung zwischen 7-Achs-Leichtbauroboter und 3D-Stereokamera

**Bujotzek, Markus**
Entwicklung und Validierung eines fusionierten Sensorsystems für die detaillierte Erfassung von Körperbewegungen beim Manipulieren eines Objekts für die automatische Unterstützungssteuerung eines Exoskeletts

**Peissner, Karsten**
Entwicklung und Konstruktion eines Linearmesssystems für Kunststofffaserseile

**Schneider, Julian**
Regelungstechnische Kompensation des Umkehrspiels auf Basis des Motorstroms bei Zahnstange-Ritzel-Antrieben

**Niebuhr, David**
Konzeption eines flexiblen Leitsystems für rekonfigurierbare Roboteranlagen

**Neumann, Rebekka**
Algorithmische Unterstützung bei der Auswahl eines Fertigungsverfahrens

**Dittrich, Alexander**
Clustering and classification approaches of biomechanical motion data for human activity recognition in wearable assistive systems

**Kaiser, Alexander**
Bewegungsplanung für einen Industrieroboter mithilfe von Reinforcement Learning

**Eckstein, Simon**
Entwicklung einer Berechnungsmethode für den kontrollierbaren Arbeitsraum eines parallelen Seilroboters

**Bittner, Jan**
Entwicklung einer Architektur zum Import von OPC UA Companion Specification in einen Wissensgraphen

**Becker, Marie-Claire**
Ableitung intelligenter selbstadaptiver digitaler Zwillinge aus Systemmodellen

**Chen, Yufan**
Vergleich von State of the Art Digitale-Zwilling-Plattformen

## 2020

**Allimant, Lukas**
Maschinelles Lernen eines Steuerungsprogramms unter Verwendung von Bayes'scher Optimierung mit Gauß-Prozessen

**Nguetse, Claude**
Konzeption eines durchgängigen Simulationsmodells für MiL-, SiL- und HiL-Simulationen

**Feilhauer, Justinus**
Vergleich einer PID- und einer modell-prädiktiven Regelung für die Flussrate des Schwerkraftgießprozesses

**Epp, Marius**
Softwaretechnische Lizenzierungsmechanismen für den Austausch von digitalen Zwillingen

**Epp, Marius**
Untersuchung der Verarbeitung von Punktwolken mithilfe von Deep Learning anhand synthetischer Sensordaten

**Alber, Severin**
Konzept und Implementierung einer anwenderorientierten Benutzungsoberfläche zur Auswahl von Funktechnologien für industrielle Anwendungsfälle

**Fritz, Ann-Kathrin**
Entwurf und Implementierung eines Architekturkonzepts für eine Plattform zur Wahl eines Fertigungsverfahrens

**Jia, Fuming**
Verbesserte Regelung eines Impuls-Zusatzaktors

**Cam, Berkay**
Konstruktion und Entwicklung eines Mehrfinger-Greifers zur Handhabung empfindlicher Bauteile

**Baier, Michael**
Analyse zur prozessübergreifenden Modellbeschreibung von Fabriksimulationen

**Pohl, Dominik**
Konzeption einer Kommunikationsschnittstelle für Industrie 4.0 IIoT-Komponenten mit Mikrocontroller-Architektur

**Wei, Liu**
Posenbestimmung für ein überbestimmtes Robotersystem zur Fertigung von großflächigen Kohlefaserbauteilen

**Wang, Xinjie**
Objektinstanzerkennung mit schnellem, inkrementellem Training

**Zakes, Hannes**
Auf synthetischen Daten trainiertes neuronales Netz zur globalen Erfassung in der 6D-Posenschätzung

**Arsenic, Dragan**
Analyse und Vergleich bestehender Steuerungskern-Architekturen und deren Erweiterbarkeit

**Alber, Severin**
Konzeption und Aufbau einer Data-Science-Architektur

**Richter, Max**
Zeitoptimale Bahnplanung mehrachsiger Bearbeitungsprozesse unter Ausnutzung von Orientierungstoleranzen

**Teufel, Felix**
Konstruktion und Auslegung einer Hubkinematik für die Positionierung von Fixierelementen bei der automatisierten Werkstückaufspannung

**Lotz, Johannes**
Entwurf eines flexiblen Echtzeit-Regelverfahrens für einen Leichtbauroboter auf Basis von PREEMPT_RT-Linux

**Link, Steffen**
Optimierung eins intelligenten Werkstückträgers durch Modularisierung der Baugruppen und Integration einer drahtlos Ladefunktion

**Ksouda, Ahmed Yassine**
Development of a modular system for fixture elements of form-adaptive clamping systems

**Saueressig, Sebastian**
Entwicklung eines Engineering-Toolings für die nutzerfreundliche Entwicklung von Smart Services im Shop-Floor-Umfeld unter Verwendung von SFSC als Kommunikationsmedium

**Hierholz, Alice**
Antriebsbasierte Störunterdrückungsregelung für Industrieroboter mit elastischen Gelenken

**Tapley, Kenton**
Untersuchung und Demonstration zur Kopplung realer Produktionsanlagen und deren digitaler Zwillinge

**Börsig, Benedikt**
Softwareentwicklungsprozess für App-basierte Automatisierungsplattformen im Bereich Montagetechnik

**Strobel, Tim**
Evaluierung eines Bahnplanungsverfahrens für die mehrachsige additive Fertigung ohne Stützstrukturen

**Bohner, Christian**
Konstruktion und Auslegung einer seriellen 2D-Kinematik und ihrer Antriebselemente für eine automatisierte Werkstückfixierung

**Fan, Hao**
Recherche und Klassifikation der Fluidmodellierung in der Hardware-in-the-Loop-Simulation

**Wu, Tong**
Entwicklung einer energiebasierten Vorwärtskinematik für parallele Seilroboter

**Niegisch, Corinna**
Entwicklung eines Verfahrens zur Kompensation von Verzug in laserbasierten Pulverbettverfahren

**Heer, Silas**
Diskrete Rekonfiguration eines parallelen Seilroboters

**Ben, Mansour Raed**
Entwurf und Implementierung einer algebraischen Bahnplanungsmethode für zusammengesetzte NURBS-Flächen anhand eines Beispielbauteils

**Böttcher, Jan**
Analytische und simulative Untersuchung von magnetorheologischen Flüssigkeiten für die Entwicklung eines Versuchsstandes und die Verwendung in sicherheitsgerichteten Funktionen

**Holzapfel, Erik**
Konzept für eine graphenbasierte Fähigkeitsbeschreibung eine komplexen Montageanlage

**Hekeler, Marc**
Entwurf und Implementierung eines Visualisierungs- und Explorationskonzeptes für automatisierte Literaturanaylsen am Beispiel des Cloud Manufacturings

**Sawodny, Julia**
Identifikation von Dynamikparametern deformierbarer Objekten zur simulationsgestützten Manipulation mit Robotern

**Teicht, Steffen**
Systemanalyse und Auswahl eines Reglers für den Schwerkraftgießprozess

**Nistler, Maximilian**
Geometrische Modellrekonstruktion auf Basis von Höhen- und Temperaturmesswerten für das DED-Verfahren

**Bromberger, Aiko**
Mathematische Modellierung und Regelung einer sphärischen Parallelkinematik mit vier pneumatischen Aktoren

**Hintz, Kevin**
Verfahren zur simulationsgestützten Generierung von Trainingsdaten für ein Convolutional-Neural-Network zur Griffpunktdetektion

**Eichinger, Paul**
Entwicklung einer Prozesskette zur automatisierten Produktherstellung von personalisierten Computermäusen

**Nitsche Philipp**
Genaues dynamisches 3D-Messen mit Industrie-Robotern

**Braitmaier, Marcel**
Entwicklung einer 3D-Obekterkennung zur automatisierten Kommissionierung mit einem Robotergreifer

**Hitzer, Julian**
Entwicklung einer Methode für die Bewertung von Industrierobotern für die Bearbeitung

**Reichle, Alexander**
Konzeption eines Feature- und Skill-basierten Datenmodells für das Datenmapping von Fähigkeiten in einer Datenbank am Beispiel von Baumaschinen

**Fritz, Daniel**
Entwicklung einer Methode zur automatisierten Betriebsmittelanordnung im Bereich der Brownfield-Planung

**Ehinger, Thomas**
Merkmalsextraktion von Zeitreihendaten für das maschinelle Lernen von Prozesskenngrößen

**Visotschnig, Maximilian**
Modellierung, Konzeption und Entwicklung einer flexiblen Systemarchitektur eines cyber-physischen Prozessregelungssystems

**Yüzüncü, Nadir**
Konzeption eines verteilten Multi-Agentensystem-Modells für die Realisierung von zusammengesetzten cyberphysischen Systemen

**Klingel, Lars**
Anwendungsfall-getriebene Anforderungsanalyse an HiL-Simulationen als Reinforcement Learning Environment

**Burr, Felix**
Entwicklung eines Softwarewerkzeugs zur automatisierten Portierung und Anbindung von Steuerungskomponenten mithilfe von Automatisierungsprotokollen innerhalb des Shop-Floors

**Mehdi, Nouisser**
Konzeption eines modularen Schulungssystems am digitalen Zwilling

**Ma, Yue**
Konzept und Realisierung einer vollautomatischen Prozessannäherung von CNC-Fertigungsprozessen mittels Reinforcement-Learning

**Kalafat, Yalcin**
Machining data processing and CNC-interface design for enabling machine learning

**Krank, Torsten**
(Online) Parameterbestimmung und -schätzung für den Gießprozess

**Ferner, Philipp**
Technische und wirtschaftliche Optimierung von Anlagen mittels unsupervised machine learning Methoden in einer Microservice-Architektur

**Yuan, Xiaozhou**
Analyse und Systematisierung von Methoden für die automatische Generierung von Montagesequenzen aus der Produktbeschreibung

**Wörner, Veit**
Effizienzsteigerung bei der virtuellen Inbetriebnahme

**Rausch, Kathrin**
Entwicklung und Umsetzung einer Seilkraftregelung für parallele Seilroboter





**Neff, Sascha**
Vereinheitlichung von Datenformaten aus den Domänen Bau und Fertigung

**Steinle, Lukas**
Robuste Regelung von Industrierobotern mit semiaktiver Dämpfung zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens

**Dast, Andreas**
Konzeption und Realisierung einer Steuerung für eine mobile Roboterplattform für den Materialtransport zwischen Produktionsmitteln

**Walker, Moritz**
Konzeption und Realisierung eines Isolations- und Kommunikationsmechanismus zur Erweiterung der Steuerungsfunktionalität um Mehrwertdienste

**Neudorfer, Lukas**
Entwicklung und Implementierung von interpolierenden Klothoidensplines zur Ausführung in einer Werkzeugmaschinensteuerung

**Mei, Xiaodong**
Graphenbasierte Beschreibung der Anlagenfähigkeiten im Bereich der Montage

**Schnabel, Benjamin**
Konzeption eines durchgängigen Simulationsmodells für MIL-, SIL- und HIL-Simulationen

**Nagel, Rene**
Konzeption und Entwicklung einer AR-Anwendung für Kameras und deren digitaler Zwillinge

**Pfitzner, Hannes**
Entwicklung einer formwandelbaren Oberfläche

**Geerkens, Felix**
Entwicklung eines Vorgehens zur Planung & Konfiguration der Vernetzung von Produktionsanlagen im Hinblick auf Industrie 4.0

**Baur, Johannes**
Entwicklung einer automatisierten Pflanzen-Scananlage zum Einsatz in der biologischen Forschung ? Konzeption, Entwurf und Erprobung

**Rhoden, Elias**
Entwicklung eines Störgrößenschätzers für Zahnstange-Ritzel-Antriebe

**Sankal, Talib**
Prototypische Umsetzung des zentralen Konfigurationsansatzes für TSN-Netzwerke

**Riegraf, Aaron**
Robuste antriebsbasierte Schwingungsdämpfung von Industrierobotern unter Verwendung von Gain-Scheduling

**Prokop, Eric**
Realisierung einer nachrichten-basierten Kommunikationsschnittstelle für Industrie 4.0 IIoT-Komponenten mit Mikrocontroller-Architektur

**Petschuch, Lena**
Analyse von Methoden zur sicheren Berechnung von Fließkommazahlen

**Pan, Qizhen**
Methode zur Lokalisierung und Zustandsschätzung linear deformierbarer Objekte mit verzweigter Struktur in Echtzeit

**Rödel, Alain**
Entwicklung eines Frameworks zur Produktionsorganisation auf Basis des Konzepts der Verwaltungsschale

**Chehoudi, Moatez**
Entwicklung und Implementierung von sicherheitsrelevanten Funktionen für den Schwerkraft-Gießprozess

**Götza, Maureen**
Entwicklung einer browserbasierten Visualisierung auf Basis der Game-Engine Unity3D

**Wenig, Fengze**
Implementierung von Flüssigkeitshandling eines Industrieroboters für die virtuelle Inbetriebnahme

**Gerlach, Jenin**
Systementwicklung einer Steuerung und Regelung für pneumatisch aktuierte Verschattungselemente

**Heilmeier, Daniel**
Hierarchical Reinforcement Learning für die Erstellung von kraftgeregelten Roboterprogrammen in der Montage

**Waggershauser, Mario**
Modellbildung dynamischer Systeme über Verwendung eines Autoencoders

**Garces, Jakobo Parroquin**
Adaptive discretization and structuring algorithms for topology-optimized LLM components

**Andlauer, Jan**
Entwickeln eines Algorithmus für einen selbstparametrierenden Zusatzaktor

**Neumann, Micha**
Untersuchungen zum regelungstechnischen Verhalten von Vakuumgreifern

**Nagel, Patrick**
Virtuelle Inbetriebnahme einer automatisierten Werkstückaufspannung für die roboterbasierte Holzbearbeitung

**Velimirovic, Nikola**
Umkehrspieldetektion anhand des drehmomentbildenden Stroms an Zahnstange-Ritzel-Antrieben

**Hayrapetyan, Gevorg**
Entwicklung einer Kraftmesssensorik für die automatisierte Werkstückaufspannung und Prozessüberwachung

**Petrov, Dimitrij**
Entwicklung und Implementierung einer asynchronen Interpolation zur Überlagerung von Bewegungen in Werkzeugmaschinen

**Makni, Omar**
Konzept und Implementierung von Objektdetektion aus Basis von faltenden neuronalen Netzen in Echtzeitanwendungen der Steuerungstechnik

**Yildiz, Ülgen**
Untersuchung von Energiesparmechanismen in Computersystemen für den Einsatz in Echtzeitsystemen in der Produktion am Beispiel des SPS

**Gümüs, Oguzhan**
Experimentelle Validierung eines topologieoptimierten, generativ hergestellten Lagerbocks einer Kugelgewindetrieb-Vorschubachse

**Rafe, Shadi**
Entwicklung von Simulationsmodulen für die industrielle Kommunikationstechnik: Nachrichten-Quellen und Senken

**Abdallah, Lukas**
Development of a network structure for deep reinforcement learning

**Elshenoudy, Omar**
Bearbeitung von RGB-Daten mit maschinellen Lernverfahren zur Handposenerkennung für die manuelle Montage

**Kieferle, Chiara**
Entwicklung und Erprobung eines Antriebskonzepts für einen Leichtbaurobotergreifer auf Basis von Formgedächtnisaktoren

**Jiang, Qixing**
Automatisiertes Schwerkraftgießen: Modellierung von Schwappverhalten

**Schneider, Wiebke**
Entwicklung einer Methodik zur Identifikation der Dynamik von Industrierobotern

**Bartman, Michael**
Reinforcement Learning auf Basis einer Software-in-the-Loop Simulation zum Lösen einer Kabel-Handhabungsaufgabe

**Huschke, Dominic**
Entwicklung und Integration eines hybriden Antriebssystems für Industrieroboter

**Zhang, Jingcai**
Analyse der Echtzeitfähigkeit von Virtualisierung in der Produktion

**Yang, Haohua**
Umsetzung hochperformanter Interpolations- und Transformationsalgorithmen zur echtzeitfähigen Auswertung von Sensordaten

**Zheng, Xiang**
Dynamikmodell-Identifikation für Industrieroboter mit flexiblen Gelenken

**Dingler, Tobias**
Verbesserte Regelung eines Impuls-Zusatzaktors

**Marquart, Matthias**
Auslegung eines redundant verspannten parallelen Seilroboters

**Wang, Hu**
Untersuchung von Bewegungs- und Physikverhalten bestehender Animations- und Modellierungstools

**Bähr, Andreas**
Posenabhängige Adaption semiaktiver Dämpfungskonzepte zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens von Industrierobotern

**Rebhi, Abdelaziz**
Tracking und Fusion von visuellen Detektionen mehrerer Objekte für die Anwedung auf mobilen Servicerobotern

**Otoya, Juan Huapaya**
Untersuchung von aufgabenspezifischen Heuristiken für die Bahnplanung von Industrierobotern

**Arslan, Yunus**
Advanced Planning and Scheduling - Analyse und Vergleich

**Schäfer, Lars**
Generierung homogener Spannungsbereiche als Sub-Volumina für die AMAXSO-Methode zur Bauteildatenaufbereitung für das mehrachsige FDM-Verfahren





**Debera, Patrick**
Vergleich von Bahnplanungsalgorithmen für einen 7-Achs-Leichtbauroboter

**Hiller, Julius**
Entwicklung von Ansteuerelektronik für RC-Servomotoren einer Roboterhand

**Hiller, Julius**
Design and evaluation of a state observer for a kinematic chain

**Steeb, Maximilian**
Lernende adaptive Vorsteuerung für laserbasierte Pulverbettverfahren

**Özdemiroglu, Boran**
Physikalische Simulation eines parallelen Seilroboters

**Chen, Wei**
Entwicklung von Simulationsmodulen für industrielle Kommunikationstechnik: EtherCAT

**Mahfouz, Ahmed**
VHDL- und embedded Algorithmen auf einer FPGA/NIOS-CPU für verteilte Steuerungssynchronisation und Ausführung der Bewegungssteuerung

**Qiu, Yang**
Trajektorienplanung für redundante Achssysteme im Bereich der hochdynamischen Laserbearbeitung

**Lösch, Nora**
Simulative Parameterstudie zu topologisch optimierten LLM-Bauteilen

**Kimmel, Robin**
Anforderungsanalyse und Integration eines Slicers für die additive Fertigung auf einer web-basierten Plattform

**Xiang, Jiawen**
Virtueller Retrofit einer SPS-gesteuerten Fräsanlage

**Djukanovic, Aleksandra**
Definition und Abgrenzung des Cloud Manufacturing Paradigmas hinsichtlich Verteilung und Zentralisierung - eine systematische Literaturanalyse

**Chen, Yiyuan**
Umsetzung und Evaluierung von KI-gestützten Bilderkennungsverfahren auf einem Mikrocontroller

**Vogelbruch, Merlin**
Entwicklung eines Modells zur Beurteilung von Schweißnähten mittels maschinellen Lernens

**Reeber, Tim**
Bahnplanung und Steuerung eines Strahlmodulators für die Laserbearbeitung

**Atasoy, Mustafa**
Entwicklung eines Algorithmus für einen selbstparametrierenden Zusatzaktor

**Qiguan, Shiqun**
Real-time capable method for state estimation of deformable linear objects from point cloud data

**Naaseh, Tarek**
Entwicklung einer domänenspezifischen Sprache für die Erstellung von OPC UA Companion Specification

**Ping, Yiwen**
Vergleich verschiedener Softwarewerkzeuge zum Erstellen von OPC UA Informationsmodellen

**Aldayeh, Khaled**
Entwicklung einer Architektur zum Import von OPC UA Companion Specification in einen Wissensgraphen

**Bader, Joshua**
Studie zur Lageabweichung bei dezentraler Ansteuerung in interpolierenden Systemen unter Berücksichtigung verschiedener Beschleunigungsprofile

**Oechsle, Stefan**
Entwicklung einer Anwendung zur methodischen Identifikation sowie Modellierung von Bauteilvariationen in mehrstufigen Produktionssystemen

**Senst, Cathrin**
Lokalisierungsüberwachung und Relokalisierung für mobile Roboter in industriellen Applikationen basierend auf 2D-Laserscandaten

**Nitsche, Philipp**
Optimierung kollisionsfreier Bahnen für Industrieroboter

**Berner, Benjamin**
Entwicklung eines Architektur-Prototyps zur Auswertung einer Sensorhaut

**Jakob, Felix**
Entwicklung einer Anwendung für die Kategorisierung von geometrischen Fertigungsabweichungen am Beispiel von rotierenden Bauteilen

## ABGEHALTENE PRÜFUNGEN

**Zum Lehrbetrieb am ISW gehört auch das Abhalten von Prüfungen. Diese Aufgabe, die für das Institut eine nicht unerhebliche Arbeitsbelastung bedeutet, beinhaltet das Erstellen der Aufgaben, die Beaufsichtigung der Prüflinge und die anschließende Korrektur der Klausuren. Im Prüfungszeitraum sind zahlreiche Mitarbeitende in diese Tätigkeiten eingebunden.**

| Prüfung | Herbst 2020 | Frühjahr 2021 | Herbst 2021 | Frühjahr 2022 | Herbst 2022 |
|---|---|---|---|---|---|
| Steuerungstechnik mit Antriebstechnik | 76 | 233 | 69 | 202 | 71 |
| Steuerungsarchitekturen und Kommunikationstechnik | 2 | 15 | - | 12 | 1 |
| Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Industrieroboter | 73 | 33 | 78 | 24 | 75 |
| Angewandte Regelungstechnik in Produktionsanlagen | 15 | – | 12 | – | 12 |
| Produktionstechnische Informationstechnologien | 65 | 19 | 41 | 17 | 42 |
| IT-Architekturen in der Produktion | 11 | 35 | 13 | 19 | 12 |
| Simulationsgestützte Planung und Auslegung von Produktionsanlagen | 5 | – | 6 | 1 | 5 |
| Data Science in der Produktion | 1 | 8 | – | 6 | 1 |
| Modellierung software-intensiver Systeme | – | – | – | – | 1 |
| Modellierung, Analyse und Entwurf neuer Roboterkinematiken I / II | 5 | – | 8 | – | 6 |
| Robotersysteme – Anwendungen aus Industrie und Servicerobotik | 25 | – | 23 | – | 22 |
| Robotersysteme – Anwendungen aus der Servicerobotik | 10 | 41 | 5 | 44 | 2 |
| Planung von Robotersystemen | – | 5 | – | 6 | – |
| Ölhydraulik und Pneumatik in der Steuerungstechnik | 26 | 8 | 14 | 14 | 8 |
| Automatisierung in der Montage- und Handhabungstechnik | 34 | 10 | 32 | 11 | 22 |
| Grundlagen der Bionik | 12 | 2 | 11 | – | 10 |
| Mechatronische Systeme in der Medizin – Anwendungen aus der Rehabilitation und Orthopädie | 2 | 30 | 4 | 27 | – |





## EXKURSIONEN FÜR STUDIERENDE

**Wir freuen uns, interessierten Studierenden mehrmals im Jahr Werksführungen bei innovativen Firmen der Umgebung und Besuche auf Fachmessen anzubieten. Diese beliebten Busausfahrten fördern den Kontakt der angehenden Ingenieurinnen und Ingenieure untereinander und ermöglichen hautnah Einblicke in unterschiedliche Produktionsabläufe und aktuelle technische Entwicklungen.**

Eintägige Exkursion am 21.06.2022 nach München zur **automatica**, eine Leitmesse für intelligente Automation und Robotik.

Eintägige Exkursion am 08.11.2022 nach Nürnberg auf die **sps - Smart Production Solutions**, eine der weltweit größten Messen im Bereich der Automatisierungstechnik.

## AUSZEICHNUNGEN

### Das Institut zeichnet herausragende studentische Arbeiten und Leistungen durch Auslobung von Preisen aus.

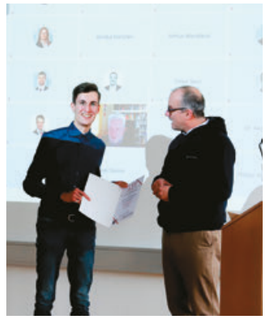
Der **Professor-Günter-Pritschow-Preis** und der **Professor-Alfred-Storr-Preis** werden für exzellente studentische Arbeiten verliehen (gesponsert von der Gottfried Stute Stiftung). Die feierliche Verleihung findet alljährlich an der Weihnachtsfeier des Institutes statt.

Das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen
verleiht den
Professor-Alfred-Storr-Preis
für exzellente studentische Arbeiten aus dem Bereich der Steuerungstechnik in Höhe von 500,- €, gefördert von der Gottfried-Stute-Stiftung, an
Johannes Clar
für die Studienarbeit:
„Marketbasierte Lokalisierung und Bahnanpassung für das Fräserwickeln mit Robotern in ROS"
(Betreuer: Martin Wolf)
Prof. Alexander Verl – Prof. Oliver Riedel
Stuttgart, den 8. Dezember 2022
Universität Stuttgart

Das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen
verleiht den
Professor-Günter-Pritschow-Preis
für exzellente studentische Arbeiten aus dem Bereich der Steuerungstechnik in Höhe von 500,- €, gefördert von der Gottfried-Stute-Stiftung, an
Patrick Riedel
für die Studienarbeit:
„Sensorlose Hysteresekompensation von Robotergelenken mit Zykloidgetrieben"
(Betreuer: Patrick Mesmer)
Prof. Alexander Verl – Prof. Oliver Riedel
Stuttgart, den 8. Dezember 2022
Universität Stuttgart

Das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen
verleiht den
Professor-Günter-Pritschow-Preis
für exzellente studentische Arbeiten aus dem Bereich der Steuerungstechnik in Höhe von 500,- €, gefördert von der Gottfried-Stute-Stiftung, an
Valentin Leipe
für die Studienarbeit:
„Vergleich von Methoden zur Zustandsrekonstruktion am Kugelgewindetrieb"
(Betreuer: Christoph Hinze)
Prof. Alexander Verl – Prof. Oliver Riedel
Stuttgart, den 8. Dezember 2021
Universität Stuttgart

Das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen
verleiht den
Professor-Alfred-Storr-Preis
für exzellente studentische Arbeiten aus dem Bereich der Steuerungstechnik in Höhe von 500,- €, gefördert von der Gottfried-Stute-Stiftung, an
Christian Bauer
für die Studienarbeit:
„Regelung eines Gießprozesses"
(Betreuerin: Anja Elser)
Prof. Alexander Verl – Prof. Oliver Riedel
Stuttgart, den 8. Dezember 2021
Universität Stuttgart



Studierende aus dem 3. Semester entwickeln im Rahmen einer Projektarbeit am Institut einen Tischkicker-Spieler:innen, der einen in Echtzeit simulierten Tischkicker steuert. Als Höhepunkt der Veranstaltung treten die virtuellen Spieler der Studierendenteams am Ende des Semesters in einem Turnier gegeneinander an. Die Siegermannschaft erhält einen Gutschein, gesponsert vom Verein der Freunde des ISW.

Das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen
überreicht dem
Sieger-Team
des Wettbewerbs
„Virtueller Tischkicker"
im Wintersemester 2022/23
einen Event-Gutschein
gefördert vom Verein der Freunde des ISW
Übereicht durch Prof. A. Verl und Prof. O. Riedel
für den Studiengang Mechatronik
Stuttgart, den 17. November 2022
Universität Stuttgart

ISW
Gutschein für das Sieger-Team 2022
„Virtueller Tischkicker"
für ein Event nach Wahl
gefördert vom Verein der Freunde des ISW
Universität Stuttgart

**Oliver Jud** wurde für seine am ISW angefertigte Masterarbeit mit dem Titel „Konzeption passiver Mechanismen zur definierten Nachstellung der Vorspannkraft bei Kugelgewindetrieben" mit dem **1. Preis der Dr. Artur-Fischer-Stiftung 2022** in der Kategorie Innovative Produktionsverfahren ausgezeichnet. Der Preis wird jährlich für innovative und zukunftsorientierte Abschlussarbeiten an der Universität Stuttgart von der Stiftung der Unternehmensgruppe Fischer verliehen.

Der VDW hat die wissenschaftlichen Mitarbeiter des ISW **Caren Dripke**, **Tonja Heinemann** und **Christian von Arnim** für das „umati" **Projekt des Jahres** 2020 ausgezeichnet. Die Preisübergabe fand auf der EMO Milano 2021 statt.

IEEE ICM 2021
IEEE International Conference on Mechatronics 2021
Outstanding Paper Award
presented to
Patrick Mesmer
for the paper entitled:
Challenges of Linearization-based Control of Industrial Robots with Cycloidal Drives
by
Patrick Mesmer, Michael Neubauer, Armin Lechler and Alexander Verl
March 8, 2021
Prof. Hiroshi Fujimoto
General Co-Chair
Prof. Valentin Ivanov
General Co-Chair

Die Publikation „Challenges of Linearization-based Control of Industrial Robots with Cycloidal Drives" von **Patrick Mesmer** (Universität Stuttgart, ISW) mit den Co-Autoren **Michael Neubauer** (Universität Stuttgart, ISW), **Armin Lechler** (Universität Stuttgart, ISW) und **Alexander Verl** (Universität Stuttgart, ISW) wurde auf der ICM2021 mit einem **Outstanding Paper Award** ausgezeichnet.

**Das Institut sowie dessen Angehörige erhielten zahlreiche Auszeichnungen für internationale Forschungsprojekte und Lehrtätigkeiten.**

**Markus Wnuk, Christoph Hinze, Manuel Zürn, Armin Lechler** und **Alexander Verl** - **Best Paper 2021**: M2VIP - The IEEE 27th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice.

**Erik-Felix Tinsel, Oliver Riedel** - **Best Conference Paper 2022**: M2VIP - The IEEE 28th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, USA

**Philipp Neher** - **Best Presentation Certificate 2022**: ICMRE 2022 - The 8th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering, Munich, Germany.

Der IntCDC Best Publication Award zeichnet jährlich bis zu zwei herausragende Publikationen aus, die im Rahmen der Forschung des Exzellenzclusters entstanden sind. Wir freuen uns, dass unser Kollege **Carsten Ellwein** gemeinsam mit seinen Co-Autoren vom ISW und IPVS Alexander Reichle, Melanie Herschel und Alexander Verl den **Best Publication Award 2021** für das Paper „Integrative data processing for cyber-physical off-site and on-site construction promoting co-design“ erhalten hat.

**Felix Trautwein, Alexander Verl -Best Paper Award 2022**: 55th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Lugano, Switzerland.

## ISW ACADEMY

**Wir haben es uns zum Ziel gemacht, gute Studierende mit Interesse an Steuerungs- und Automatisierungstechnik während ihres Studiums zu unterstützen und zu fördern und gründeten zu diesem Zweck die ISW Academy.**

Wir kümmern uns um jegliche studentische Anliegen. Falls Ihr auf der Suche nach einem geeigneten Praktikumsplatz seid, helfen wir Euch gerne mit unseren Firmenkontakten weiter.
Oder Ihr habt Lust, Eure Kenntnisse im Ausland weiter auszubauen? Dank unseren Kontakten in der ganzen Welt finden wir sicher einen geeigneten Platz für Euch. Auch in Sachen Stipendiensuche stehen wir Euch beratend zur Seite.
Bei regelmäßigen Events wie Exkursionen zu Industrieunternehmen, wie z.B. Firma HAFNER und Messebesuchen, wie beispielsweise auf der EMO Hannover oder der SPS, könnt Ihr Euch außerdem mit ehemaligen Mitarbeitern des ISW und Leuten aus der Industrie austauschen und Kontakte knüpfen.
Externe Trainer bieten Euch eine Schreibwerkstatt und Rhetoriktraining an, wodurch Ihr Euch weiterbilden könnt.
Falls Ihr also spannende Arbeit sucht, bei der Ihr Euer Wissen erweitern und die trockene Theorie endlich anwenden könnt, dann meldet Euch bei uns und wir finden gemeinsam ganz bestimmt das Richtige für Euch.

Und was bei uns natürlich nicht zu kurz kommen darf sind die spaßigen Ausflüge und Veranstaltungen, an denen Ihr als exklusives Academy-Mitglied teilnehmen könnt. Sei es mit einem Maß auf dem Wasen, beim Spanferkelgrillen oder bei einem interessanten Industry-Students-Come-Together mit einem Referenten aus der Industrie.
Steuerungstechnik kann „mehr“!

### Du willst Mitglied der ISW Academy werden?

Wenn Du Lust hast ein Mitglied der ISW Academy zu werden, dann schreibe uns einfach eine E-Mail mit Deinem Namen, Studienfach und Studiumsbeginn, Deinem Lebenslauf und einer kurzen Beschreibung was Du bereits mit dem ISW zu tun hattest an:

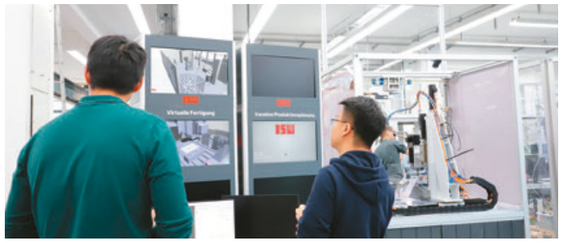
**academy@isw.uni-stuttgart.de**

Wir freuen uns auf Deine Bewerbung!

## SONSTIGE STUDENTISCHE VERANSTALTUNGEN

**Das Institut pflegt den Kontakt zu seinen Studierenden durch vielfältige Veranstaltungen und Angebote. Auch die zahlreichen wissenschaftlichen Hilfskräfte tragen zum aktiven Institutsleben bei.**

Mentoring für die Erstsemestler am ISW



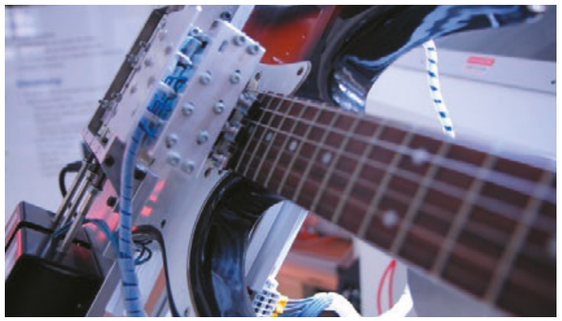
Besichtigung der ISW-Versuchsfelder mit anschließendem gemütlichen Beisammensein

**Mentoring**
Zielgruppe sind Studienanfänger, die in ihren ersten Semestern Unterstützung im „Einleben und Eingewöhnen“ an der Universität erhalten sollen. Über Informationsveranstaltungen, das Angebot von Tutoren und Mentoren und das Arbeiten in kleinen Gruppen (ca. 20 Studierende) wird das gegenseitige Kennenlernen und Bilden von Lerngruppen gefördert.

Studenten-Hocketse mit Grillen im Hof des ISW

**Hallenbesichtigungen**
Besonders wichtig und interessant für Studierenden ist der Einblick in die aktuellen Forschungs- und Arbeitsgebiete des Instituts. Die Maschinen und Anlagen in der Halle beeindrucken viele Studierende und begeistern sie so für eine Mitarbeit am Institut.

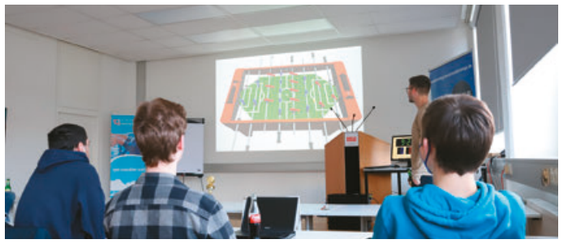
**Sommerliche Grillabende**
Damit sich Studierende der „ISW-Familie“ angeschlossen fühlen und sich gegenseitig über Jahrgangsgrenzen hinweg besser kennenlernen und vernetzen können, bietet das ISW gemütliche Grillabende und kommunikative Hocketsen an.



**Robotik-Band**
Im Rahmen von Projektarbeiten dürfen Studierende eine Robotik-Band, bestehend aus einem Schlagzeugroboter und einer Robotik-Gitarre, konzipieren und aufbauen. Die Studierenden lernen so spielerisch den Umgang mit Steuerungs- und Regelungstechnik, den Aufbau von mechatronischen Systemen sowie grundlegende industrielle Kommunikationsmechanismen. Eine Projektarbeit fand 2022 mit dem Bau des Schlagzeugroboters statt. Eine neue Projektarbeit zur Überarbeitung der Robotik-Gitarre für das Sommersemester 2023 ist ausgeschrieben.



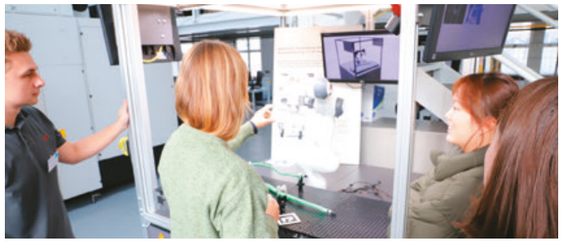




**Turnier am Virtuellen Tischkicker**
Im Rahmen einer Projektarbeit dürfen Studierende an realen SPS, gekoppelt mit einer Echtzeitsimulationsumgebung, einen virtuellen Tischkicker programmieren. Der Schwerpunkt liegt in der Implementierung der Spielertaktik und Spielintelligenz. Den Abschluss des Projekts bildet eine ViKick-WM, in der die Mannschaften gegeneinander antreten, um einen Pokal und einen Gutschein zu einem gemeinsamen Event wie Paintball oder Kartfahren zu gewinnen.

**Automatisierter Spanferkelgrill**
Bei der Projektarbeit „Automatisierter Spanferkelgrill“ geht es um die Entwicklung eines vollautomatischen Spanferkelgrills. Unter anderem wird der Grillfortschritt in einer APP überwacht und damit die Entfernung des Spanferkels zum Feuer automatisch eingestellt.

**Girls‘ Day – Mädchen-Zukunftstag an der Uni Stuttgart**
Zahlreiche Institute und Einrichtungen bereiten spannende und verblüffende Aktionen für Schülerinnen aus Stuttgarter Gymnasien vor, um zu zeigen, dass Experimentieren, Forschen und Bauen nicht nur etwas für Jungs ist! Dabei gibt es Veranstaltungen für unterschiedliche Altersgruppen. Neben der Möglichkeit, die Uni von innen zu erleben, werden faszinierende Einblicke in die Arbeit von Natur- und Ingenieurwissenschaftlerinnen sowie die seltene Chance geboten, dabei auch selbst aktiv zu werden.
Am ISW findet eine Maschinenhallenrallye statt und jede Schülerin darf einen Schlüsselanhänger mit selbstentworfenem Motiv und hierfür selbstgeschriebenem NC-Programm herstellen.



**TryScience – MINT-Studieninfo für Schülerinnen und Schüler der Oberstufe**
Das ISW hat 10 Schüler*innen eingeladen, die sich über das Studium der Mechatronik informieren konnten und in einem Hallenrundgang spannende Forschungsthemen erfahren konnten. Anschließend durften sie einen Schlüsselanhänger mit einem selbstentworfenem Motiv auf einer CNC-Maschine herstellen.

**makeMINTcool am ISW**
In Rahmen des MINT-Workshops „Vielseitige Helfer – Roboter, KI und Co.“ durften wir 10 Jugendliche aus verschiedenen Schulen in unserer Maschinenhalle begrüßen.
Bei dem eintägigen Workshop stellte das ISW die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Robotern und die Bedeutung der Steuerungstechnik vor.
Die Jugendlichen konnten einen Seilroboter steuern, ihre selbstdesignten Bauteile in 3D drucken, Bilder mit einer Lasermaschine gravieren sowie Industrieroboter teachen.

## ABGESCHLOSSENE DISSERTATIONEN

**In der Reihe „ISW Forschung und Praxis“ erschienen sämtliche abgeschlossenen Dissertationen des ISW bis 1999 im Springerverlag, herausgegeben bis Band 57 von Prof. G. Stute, ab Band 58 von Prof. G. Pritschow und von Band 161 bis Band 192 von Prof. A. Verl beim Jost-Jetter-Verlag. Seit 2013 werden die ISW-Dissertationen im Fraunhofer Verlag Stuttgart in der Reihe „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ publiziert. Seit 2022 werden die Dissertationen in der Reihe „Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau“ veröffentlicht und somit in der vierten Generation durch die heutige Institutsleitung Prof. Verl, Prof. Riedel und Jun.-Prof. Wortmann fortgesetzt.**

### 2020

**METHODE ZUR TECHNISCHEN AUSLEGUNG VON VAKUUMGREIFSYSTEMEN MIT EINER MINDESTHALTEDAUER AUF BASIS FLUIDISCHER UNTERSUCHUNGEN**

**Straub, David**

Der Trend der Robotisierung zeigt sich unter anderem darin, dass neben den Industrierobotern, die hinter Schutzzäunen zum Einsatz kommen, immer mehr Roboter für kollaborative Anwendungen herangezogen werden. Da ein großer Teil aller Industrieroboter für Handhabungsaufgaben verwendet wird, entstehen durch den schutzzaunlosen Betrieb der Roboter neue Herausforderungen für die Auslegung von für diese Handhabungsaufgaben verwendeten Greifsysteme. Sicherheitseinrichtungen formschlüssiger mechanischer Greifsysteme sind bekannt, wirken sich jedoch aufgrund der mit dem umschließenden Griff einhergehenden vergrößerten äußeren Abmaße nachteilig auf den Handhabungsvorgang aus. Vakuumgreifsysteme sind hier infolge des einseitigen Griffs im Vorteil, verfügen dadurch jedoch über keine Sicherheitseinrichtungen, die einen Verlust des Werkstücks bei Auftreten eines Energieausfalls, zumindest temporär, verhindern. Um diesen Zielkonflikt zu lösen, wird in dieser Arbeit eine Methode für die technische Auslegung von Vakuumgreifsystemen mit einer Mindesthaltedauer auf Basis fluidischer Untersuchungen entwickelt. Die dafür relevanten fluidischen Vorgänge, insbesondere die Leckage, werden ausführlich untersucht. Die entwickelte Methode nutzt die Kenntnisse der Leckage eines Referenzsystems und erlaubt es, Aussagen darüber zu treffen, wie sich Anpassungen des Referenzsystems an die jeweilige Handhabungsaufgabe auf die Haltedauer des Werkstücks auswirken. Durch die Methode ist es daher möglich, aufbauend auf dem bekannten Vorgehen zur Auslegung von Vakuumgreifsystemen zur Aufbringung einer erforderlichen Mindestgreifkraft, eine zusätzliche Auslegung zur Erreichung einer Mindesthaltedauer im Auftreten eines Energieausfalls durchzuführen.

Hrsg.: Fraunhofer Verlag Stuttgart, 2020
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 118
ISBN 978-3-8396-1666-6

**UNSTETIGE BAHNERZEUGUNG AN VORSCHUBANTRIEBEN MITTELS TRÄGHEITSBASIERTEM IMPULSAKTOR**

**Zahn, Peter**

Verschiedene maschinelle Fertigungsprozesse erfordern, dass die Vorschubachsen einer Werkzeugmaschine einer programmierten Werkstückkontur mit minimaler geometrischer Abweichung und möglichst konstanter Bahngeschwindigkeit folgen. Dies ist jedoch im Bereich von Unstetigkeiten der Bahn (wie beispielsweise Ecken) aufgrund physikalischer Begrenzungen nicht möglich, da hier eine sprungförmige Änderung der Geschwindigkeiten der beteiligten Achsen notwendig wäre. Mit üblichen Vorschubantrieben lassen sich jedoch nur stetige Änderungen der BewegungsgrößenWeg und Geschwindigkeit erreichen. Die reale Bahn entspricht somit nicht exakt der geforderten Kontur oder aber die Bahngeschwindigkeit muss bis zum Stillstand reduziert werden. Eine möglichst gute Annäherung an entsprechende Konturen bei hinreichender Bahngeschwindigkeit führt weiter durch hohe Beschleunigungskräfte aus den Motoren zu starker Anregung der Maschinenstruktur, was ein unerwünschtes Verhalten darstellt. Heute bekannte Verfahren nutzen zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens beispielsweise redundante Kinematiken, spezielle Regelungsverfahren oder optimieren die Maschinenkonstruktion hinsichtlich Steifigkeit und Dämpfung. Auch sind Methoden zur Erzeugung von anwendungsorientiert optimierten Bahnen bekannt, so dass sich ein für den jeweiligen Prozess geeigneter Kompromiss aus Konturtreue und konstanter Bahngeschwindigkeit wählen lässt. Diesen Ansätzen gemein ist jedoch, dass sie im speziellen Fall von Unstetigkeiten das dynamische Verhalten verbessern aber keine systematische Lösung darstellen. Nicht betrachtet wurde hier bisher der Ansatz, an Stelle einer Anpassung der Bahn an die dynamischen Verhältnisse, tatsächliche Geschwindigkeitsbeziehungsweise Beschleunigungssprünge aktuatorisch einzubringen. Hierzu wird in dieser Arbeit ein Antriebskonzept vorgeschlagen, welches Geschwindigkeitssprünge zwischen Werkzeug und Werkstück in guter Näherung ermöglicht sowie hohe Beschleunigungen ohne Rückwirkung auf die Maschinenstruktur aufbringen kann. Der Ansatz basiert auf der Nutzung eines trägheitsbasierten Zusatzaktors, welcher mittels Stoßes eine Impulsübertragung und dadurch eine sprunghafte Geschwindigkeitsänderung hervorzurufen vermag. Die Arbeit gliedert sich in eine Darstellung der zugrundeliegenden Problemstellung sowie einem Überblick über bereits bestehende Lösungsansätze. Das vorgeschlagene Konzept eines Impulsaktors sowie seiner Wirkungsweise wird erläutert. Zur Auslegung des Systems werden simulative Voruntersuchungen durchgeführt, gefolgt von einer experimentellen Verifikation anhand einer prototypischen Umsetzung. Basierend auf dem Experiment können unsichere Modellparameter identifiziert werden, so dass sich mit dem erstellten Mehrkörpermodell weitere Parameterstudien durchführen lassen. Es wird aufgezeigt, dass eine entsprechende Zusatzaktorik signifikantes Potential zur Optimierung von Bearbeitungsprozessen aufweist beziehungsweise neue Anwendungen erschließt, welche von einer verbesserten Bahnführung an Unstetigkeiten bei gleichzeitig reduzierter Schwingungsanregung der mechanischen Maschinenstruktur profitieren. Da Ansätze mit vergleichbarem Umsetzungsaufwand bereits etabliert sind und sich der Aktor abgesehen von Umwandlungsverlusten energetisch neutral verhält, stellt das Konzept einen vielversprechenden neuen Freiheitsgrad bei der Auslegung von Vorschubantrieben dar.

Hrsg.: Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2020
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 105
ISBN 978-3-8396-1615-4

**AUTOMATISIERTE MESSABLAUFERZEUGUNG UND 3D-DATENAUSWERTUNG IN DER MULTISENSOR-KOORDINATENMESSTECHNIK**

**Effenberger, Ira**

In der industriellen Fertigung gewinnt die vollständige Erfassung und Prüfung der Geometrie von komplexen Bauteilen oder Baugruppen zunehmend an Bedeutung. Die gewonnenen Daten bilden im Rahmen der Entwicklung die Grundlage für komplexe Simulationen auf Basis der realen Werkstückgeometrie, im Bereich der Qualitätssicherung sind sie die Grundlage für die Optimierung der Herstellungsprozesse und Sicherstellung der Produktqualität. Seit einigen Jahren sind dafür Multisensor-Koordinatenmessgeräte etabliert, die durch den flexiblen Einsatz unterschiedlichster Sensoren die Möglichkeit bieten, verschiedene Bereiche am Werkstück jeweils anforderungsgerecht und effizient zu erfassen. Die effiziente Anwendung solcher Multisensor-Systeme setzt aufgrund ihrer Komplexität allerdings ausgeprägtes Vorwissen und Erfahrung des Anwenders voraus. In dieser Arbeit werden Verfahren zur automatisierten, geometriebasierten Messablauferzeugung und 3D-Datenauswertung für Multisensor-Koordinatenmessgeräte vorgestellt, die eine intelligente Unterstützung des Anwenders ermöglichen. Zunächst werden, ausgehend von den ermittelten Defiziten der aktuell verfügbaren Systeme, Anforderungen an die zu entwickelnden Verfahren formuliert und ein geeignetes, modulares Softwarekonzept abgeleitet. Neben Algorithmen zur Aufbereitung von CAD-Modellen liegt der Fokus der Arbeiten auf automatisierten Verfahren zur Berechnung von Sollpunkten auf CAD-Modellen, die eine Datenerfassung mit unterschiedlichen Sensoren erlauben. Hierbei muss auch die Sensorpositionierung berücksichtigt werden, mögliche Kollisionen erkannt sowie Strategien zur automatischen Umfahrung bereitgestellt werden. Darüber hinaus werden intelligente Verfahren zur Auswertung der Messpunkte vorgestellt, wobei ein besonderes Augenmerk auf große Messpunktwolken, die beispielsweise bei Anwendung der Computertomographie entstehen, gelegt wird. Abschließend wird die Funktionalität der umgesetzten Verfahren in Anwendungstests zur kombinierten Messung mit mehreren Sensoren und

zur automatisierten Ausrichtung von CAD-Modell und Messpunktwolke gezeigt und die erzielten Ergebnisse ausgeführt.
Hrsg.: Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2020,
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 109,
ISBN 978-3-8396-1632-1

**OPTIMIZED MODEL-BASED PATH GENERATION FOR ROBOTIC MANUFACTURING PROCESSES**

**Diaz Posada, Julian Ricardo**

Der wissenschaftliche Beitrag zeigt anhand der Anwendungsbeispiele, dass die erforderliche Roboterprogrammierungszeit und die endgültige Qualität des Roboterprozesses durch die Verwendung des vorgeschlagenen Ansatzes und der vorgeschlagenen Architektur verbessert werden können. Der Vergleich zwischen dem weit verbreiteten Teach-In-Ansatz und kommerzieller OLP-Software beweist diese Verbesserung. Dieser Ansatz stellt sicher, dass für die Programmierung von Robotern keine Experten erforderlich sind, wenn Roboter-Fertigungsmodelle verwendet werden. Außerdem können die Roboterherstellungsprozesse nach der methodologischen Interpretation des RMP automatisch mit probabilistischen Algorithmen optimiert werden. Die Optimierung basiert sich auf eine allgemeine Architektur, die für mehrere Anwendungsfälle verwendet werden kann, die die Lösung des oben definierten Forschungsproblems widerspiegeln.
Hrsg.: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2020
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 106
ISBN 978-3-8396-1614-7

**GENERIERUNG DES DIGITALEN ZWILLINGS FÜR DEN SONDERMASCHINENBAU MIT LOSGRÖSSE 1**

**Scheifele, Stefan Michael**

Vom Maschinenbau erwartet der Markt kundenspezifische und kurzfristig lieferbare Maschinen und Anlagen in hoher Qualität bei zunehmender Komplexität, bedingt durch einen zunehmenden Automatisierungsgrad. In den letzten Jahren optimierten innovative Anlagenhersteller dafür ihren Entwicklungsprozess durch Softwaretools für die Projektierung und durch Generatoren für die weitgehend automatische Erstellung von anlagenspezifischer Software und Parameterlisten für die Automatisierungsgeräte. Obwohl die dabei genutzten einzelnen Softwarebausteine immer wieder verwendet werden und man diese weitgehend als fehlerfrei erwarten darf, ist die neue automatisch generierte Kombination dieser oft nicht fehlerfrei. Bis zum Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme, welche die reale Steuerung an einem virtuellen Abbild der realen Maschine, der sog. „virtuellen Maschine", betreibt und testet, konnten solche Fehler häufig erst bei der Inbetriebnahme der Anlage erkannt werden und waren dann aufwändig unter Zeitdruck zu korrigieren. Der Aufbau einer solchen virtuellen Maschine ist heute eine manuelle, zusätzliche und teure Aufgabe für Experten, obwohl doch die reale Maschine selbst samt Steuerungstechnik weitgehend automatisch im Engineeringprozess konfiguriert, parametriert und programmiert werden kann. Im Rahmen der Arbeit wird daher zunächst dargestellt, nach welchen Prinzipien sich Maschinen und Anlagen heute auf Basis eines Baukastens aus wiederverwendbaren mechatronischen Baugruppen erstellen lassen, um dann der Frage nachzugehen, wie sich die mechatronische Aufteilung in Baugruppen auf die virtuelle Maschine übertragen lässt. Durch die anschließende Überführung von mechatronischen Baugruppen in cyber-physische Systeme (CPS) wird eine 1:1-Beziehung zwischen realer und virtueller Baugruppe umgesetzt, was den im Maschinenbau eingeführten Engineeringprozess im Kern unverändert lässt, den zu verändern bereits frühere andere Ansätze in der Praxis hat scheitern lassen. Zudem entsteht durch die CPS-Sichtweise die Möglichkeit, kinematische Ketten und Querbeziehungen aus der virtuellen Maschine zu erkennen und so die Erstellung des Simulationsmodells erstmals ganzheitlich zu automatisieren.
Hrsg.: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2020
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 107
ISBN 978-3-8396-1618-5

**KONZEPT FÜR EINE SICHERE UND BENUTZERFREUNDLICHE AUTHENTIFIZIERUNG FÜR INDUSTRIELLE PRODUKTIONSANLAGEN**

**Borisov, Alexander**

Die Anzahl und die Schwere der Angriffe auf industrielle Komponenten nehmen von Jahr zu Jahr stark zu. Gleichzeitig steigt der Grad der Vernetzung der Anlagen weiter an und vergrößert dadurch nochmals die mögliche Angriffsfläche. Die aktuelle Situation bezüglich IT-Sicherheit in der fertigenden Industrie erfordert eine dringende Verbesserung der vorhandenen IT-Sicherheitsmaßnahmen. Insbesondere weisen die existierenden Authentifizierungsmöglichkeiten in der Industrie mehrere Defizite auf. Die Sicherheit der zurzeit eingesetzten Methoden, ihre Benutzerfreundlichkeit und auch der monetäre Aufwand für den Betrieb sind bei zahlreichen Anwendungen nicht zufriedenstellend. Seitens der Industrie und auch der Forschungsgemeinschaft besteht daher der Bedarf, bessere Authentifizierungsverfahren zu entwickeln. Die Erforschung einer neuen Authentifizierungsmöglichkeit für eine industrielle Anwendung bildet den Hauptteil der vorliegenden Arbeit. Die in dieser Arbeit erarbeitete Authentifizierungsmethode basiert auf der Verwendung von zeitbasierten Einmalschlüsseln, die über eine speziell entwickelte App im Smartphone des Benutzers generiert werden. Dabei findet eine beidseitige und eine Zwei-Faktor-Authentifizierung statt. Die Authentifizierungsinformationen werden zudem über die Verbindung des Smartphones an den Server übertragen. Die Lösung weist somit eine hohe Benutzerfreundlichkeit, starke Sicherheit und geringe Betriebskosten auf. Diese Eigenschaften wurden im Rahmen dieser Arbeit experimentell bestätigt und in einer Benutzerstudie nachgewiesen. Darüber hinaus wurde in der Arbeit gezeigt, wie die entwickelte Authentifizierungslösung in eine IT-Sicherheitsarchitektur eines Werkes integriert werden kann. Die vorliegende Arbeit leistet somit einen Beitrag zur Verbesserung der IT-Sicherheit in der produzierenden Industrie und kann für die Institute der angewandten Forschung sowie auch für die Entwicklungsabteilungen der Industrieunternehmen von Bedeutung sein.
Hrsg.: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2020
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 101
ISBN 978-3-8396-1586-7

**AUFGABENORIENTIERTE ROBOTERPROGRAMMIERUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON GEOMETRISCHEN BAUTEILABWEICHUNGEN BEIM LICHTBOGENSCHWEISSEN**

**Kuss, Alexander**

Die einfache und flexible Programmierung von Industrieroboter stellt eine wesentliche Herausforderung für den erfolgreichen Robotereinsatz für Produktionsaufgaben dar. In dieser Arbeit wird ein aufgabenorientiertes Programmiersystem für das robotergestützte Lichtbogenschweißen entwickelt, welches eine sensorbasierte Anpassung von Roboterprogrammen an geometrische Bauteilabweichungen bereits bei der Programmplanung ermöglicht. Zunächst werden das Gesamtkonzept des Programmiersystems und die Modellarchitektur konzipiert. Hierbei wird eine Aufgabenbeschreibung zur Repräsentation von Schweißaufgaben bei geometrischen Bauteilabweichungen entwickelt. Zudem wird ein Technologiemodell zur Modellierung und Wiederverwendbarkeit von generalisiertem Fertigungswissen über den Schweißprozess eingeführt. Darauf aufbauend werden Planungsverfahren zur automatischen Erkennung und Anpassung von Schweißaufgaben sowie zur Erstellung von entsprechenden Roboterprogrammen vorgestellt. Zudem werden Verfahren entwickelt, um mittels 3D-Sensorik geometrische Bauteilabweichungen zu bestimmen und das zugehörige Geometriemodell anzupassen. Zunächst wird ein Verfahren zur Bestimmung von Lageabweichungen basierend auf einer Variante des Iterative-Closest-Point-Algorithmus vorgestellt. Außerdem wird ein Verfahren entwickelt, das als Erweiterung der sogenannten Freiform-Deformation eine nicht-rigide Registrierung und damit eine Anpassung des Geometriemodells an Formabweichungen ermöglicht. Weiterhin wird ein Modell des Lichtbogenschweißprozesses entwickelt, um innerhalb des Programmiersystems automatisch auf die erkannten Bauteilabweichungen reagieren und die Programmplanung entsprechend anpassen zu können. Dabei erfolgt die Modellierung des Zusammenhangs zwischen Bauteilgeometrie und Schweißprozessparametern sowie die Ableitung verschiedener Strategien zur Adaption des Schweißprozesses. Das entwickelte Programmiersystem mit den Verfahren zur sensorbasierten Anpassung des Bauteilgeometriemodells und dem Modell zur Schweißprozessanpassung wird schließlich mit einer industriellen Schweißroboterzelle evaluiert. Dazu werden Schweißnähte an Versuchsbauteilen mit vorgegebenen Lage- und Formabweichungen erzeugt und den Schweißergebnissen einer Vergleichsgruppe ohne Nutzung der entwickelten Verfahren gegenübergestellt. Hierbei kann eine deutliche Erhöhung der Nahtqualität sowie eine Reduktion der Qualitätsschwankung nachgewiesen werden. Die Arbeit leistet damit einen Beitrag zur adaptiven Programmierung von Industrierobotern im Bereich des Lichtbogenschweißens.
Hrsg.: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2020
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 119
ISBN 978-3-8396-1680-2

**BEWERTUNG ELEKTROADHÄSIVER GREIFER FÜR DIE INDUSTRIELLE HANDHABUNG VON BLECHTEILEN**

**Defranceski, Aline**

Die moderne Produktion erfordert eine flexible Reaktion auf die Verbraucherwünsche. In der Fertigungsautomatisierung entsteht so der Bedarf nach hoch dynamischen und an die Produktionserfordernisse anpassbaren Fertigungssystemen. Handhabungssysteme müssen in der Lage sein, eine hohe Varianz an Werkstücken zu fördern. Herkömmlich industriell eingesetzte Greifer sind auf Grund ihrer physikalischen Eigenschaften in ihrer Anwendungsbreite zum Teil stark begrenzt. Die Forderung nach Greifern mit einer höheren Flexibilität führt zu Entwicklungen alternativer Greifprinzipien, wie dem elektroadhäsiven Greifen. In dieser Arbeit wird das elektroadhäsive Greifprinzip für den Einsatz von Pick & Place-Anwendungen von Blechen in (teil-)automatisierten Prozessen auf seine Industrietauglichkeit untersucht. Ziel ist es, insbesondere die Tauglichkeit hinsichtlich Flexibilität und Einsatzbreite zu ermitteln, um so eine Abschätzung treffen zu können, ob elektroadhäsive Greifer als Alternative zu herkömmlich industriell eingesetzten Greifsystemen Anwendung finden können. Dazu werden Rechenmodelle aufgestellt, die die theoretische Einsatzfähigkeit der Technologie ermitteln sollen. Diese werden anschließend um Faktoren erweitert, welche nicht optimale Handhabungsprozesse abbilden, um so eine verbesserte Abschätzung hinsichtlich der Prozesstauglichkeit elektroadhäsiver Greifer treffen zu können. In einem zweistufigen praktischen Experiment wird das Verhalten realer Greifer untersucht. Zuerst werden anhand optimaler Werkstücke die Einflüsse unterschiedlicher Greifer- und Werkstückparameter auf die Haltekraft ermittelt. In einem zweiten Experiment wird die Prozesssicherheit und Anwendungsbreite eines kommerziell erhältlichen Greifers an einem Blechteilsatz erarbeitet, welcher typische Bearbeitungsmerkmale einer Laserschneidanlage aufweist und somit nicht optimale Handhabungseigenschaften hat. Die Experimente werden anschließend den theoretischen Rechenmodellen gegenübergestellt. Die Aussagefähigkeit der jeweiligen Rechenmodelle hinsichtlich des realen Verhaltens des elektroadhäsiven Greifers wird ermittelt und somit

eine Abschätzung hinsichtlich der Tauglichkeit für den industriellen Einsatz gegeben.
Hrsg.: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2020, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 115, ISBN 978-3-8396-1657-4

**ENTWICKLUNG EINES MODULAREN UND STÜCKZAHL-FLEXIBLEN QUALITÄTSKONZEPTS FÜR SCHWERE NFZ-HYBRIDGETRIEBE**

**Butov, Alexej**

Die Elektrifizierung der Fahrzeuge nimmt sowohl im Pkw als auch im Bereich der Nfz stetig zu und damit auch der Druck auf die Hersteller und Zulieferer eigene Fertigungsstraßen weiter zu optimieren. Potentiale sind für Nfz andere als die für Pkw, da zum einen die Anzahl der Neuzulassungen und die Lebensdauer der Komponenten unterschiedlich sind. Die Fertigungsstraßen im Nfz-Bereich sind daher effizient, und flexibel zu gestalten. Potentiale dafür bietet der Bereich der Elektromotorenfertigung, speziell für Permanenterregte Synchronmotoren (PMSM). Die Notwendigkeit flexible und modulare Fertigungsstraßen auf Grund ungewisser Stückzahlen zu entwerfen, ist in öffentlich, geförderten Projekten wie bspw. Erforschung eines prozessmodularen Fertigungskonzepts für die E-Motorenfertigung (Epromo) thematisiert worden. In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, unter welchen Voraussetzungen eine passive und damit rein generatorische End of Line (EoL) Funktionsprüfung für einen PMSM, der für den Einsatz in einem schweren Nutzfahrzeuggetriebe ausgelegt ist, durchgeführt werden kann. Neben den bereits genannten Gründen sind die hohen Investitions- und Wartungskosten für eine aktiven, dynamischen EoL-Funktionsprüfstand insbesondere für den OEM wichtig zu betrachten und abzuwägen. Dazu wird zunächst der Stand der Technik zu bekannten Fehlererkennungsmethoden ermittelt und mit vorhandenen Normenvorgaben abgeglichen. Weiter werden Fehlervarianten identifiziert, historische Messwerte unterschiedlicher EoL-Serienprüfstände betrachtet und signifikante Fehler an Hand von Versuchsmotoren an unterschiedlichen Prüfständen untersucht. Der erarbeitete Vergleich soll bspw. einem Fertigungsplaner dabei helfen eine bessere Entscheidung zu treffen, welche Prüfphilosophie an der EoL-Prüfstation auch bei geringen oder unsicheren Stückzahlen eingesetzt werden kann. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Entscheidung der Prüfphilosophie systematisch und anhand der Analyse vorhandener Kriterien getroffen werden kann.
Hrsg.: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2020, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 111, ISBN 978-3-8396-1634-5

**CLOUD-BASED COOPERATIVE LONG-TERM SLAM FOR MOBILE ROBOTS IN INDUSTRIAL APPLICATIONS**

**Dörr, Stefan**

Mobile Roboter wie fahrerlose Transportsysteme (FTS) erfahren seit Jahrzehnten zunehmend Anwendung für intralogistische Aufgaben im Bereich der industriellen Produktion und Logistik. Um die benötigten Verfügbarkeiten dieser industriellen Anforderungen zu erreichen, benötigen derzeitig kommerziell verfügbare Navigationslösungen zumeist zusätzliche in die Umgebung eingebrachte Infrastruktur, wie magnetische Leitlinien oder retro-reflektive Marker, oder sind begrenzt auf Anwendungsgebiete mit stark strukturierten, unveränderlichen Umgebungen. Die derzeit steigende Nachfrage nach hochflexiblen FTS, welche auch im dynamischen Umfeld und in nicht-abgetrennten Arbeitsbereichen mit Menschen und anderen Fahrzeugen effizient navigieren, kann mit diesen Lösungen nur unzureichend befriedigt werden. Navigationslösungen, die diesen hohen Anforderungen gerecht werden, müssen vielmehr über einen gesteigerten Autonomiegrad verfügen und gleichzeitig bestehende Anforderungen hinsichtlich Verfügbarkeit und Präzision aufrechterhalten. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung entsprechender Navigationsverfahren unter Ausnutzung aktueller Entwicklungen im Bereich der Industrie 4.0 und Cloud-Robotik. Konkret wird ein cloud-basiertes, kooperatives Navigationsverfahren vorgestellt, welches die Vernetzung der Roboter untereinander sowie die Ausnutzung externer Rechenressourcen auf Cloud-Servern integriert. Um derzeitige Beschränkungen im Bereich der drahtlosen Datenübertragung zu berücksichtigen, verbleiben dabei Basis-Navigationsfähigkeiten auf den mobilen Robotern, wodurch deren Navigationsfähigkeit auch bei Netzwerkverbindungsabbrüchen aufrecht erhalten wird. Auf Cloud-Servern ausgelagerte, kooperative Navigationsverfahren sorgen hingegen für die notwendige Langzeitstabilität der Navigation, auch in herausfordernden Umgebungen. Eine Schlüsselfähigkeit des kooperativen Navigationssystems ist das Generieren von stets aktuellen Umgebungskarten für Lokalisierung und Pfadplanung basierend auf den Sensorbeobachtungen der gesamten Roboterflotte. Hierfür wird ein kooperativer Long-Term Simultaneous Localization and Mapping (LT-SLAM)-Ansatz präsentiert, bei welchem jeder Roboter detektierte Kartenänderungen an den cloud-basierten LT-SLAM-Server überträgt. Dieser fusioniert die eingehenden Karteninformationen in eine konsistente, globale Karte und stellt diese den einzelnen Robotern in Form von Karten-Updates zur Verfügung. Zusätzlich wird ein Verfahren zur gegenseitigen Detektion der Roboter und zum Austausch von Lokalisierungsinformationen integriert. Ein weiterer Fokus der Arbeit liegt auf der EntwickSummary lung einer Kartenrepräsentation, welche die vielfältigen und teils konträren Anforderungen dieser Applikationen erfüllt. Sowohl Wirksamkeit als auch praktische Anwendbarkeit werden anschließend in verschiedenen Simulations- und Echtwelt-Experimenten nachgewiesen. Dabei überzeugt der vorgestellte Ansatz insbesondere in erhöhter Lokalisierungspräzision und -robustheit, kürzeren Navigationswegen gegenüber unvernetzten Ansätzen sowie moderaten Netzwerkauslastungen..
Hrsg.: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2020, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 113, ISBN 978-3-8396-1645-1

**SYSTEM UND METHODE ZUR PLANUNG VON PRODUKTIONSSYSTEMEN AUF BASIS DER 3D-DIGITALISIERUNG BESTEHENDER STRUKTUREN MIT FARBINFORMATION**

**Schindler, Matthias**

Produzierende Unternehmen erweitern ihr Angebot auf durch Abnehmermacht gekennzeichneten Absatzmärkten ständig, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Dieser Trend impliziert eine Verkürzung der Produktionsdauer und eine Verbreiterung der Angebotspalette. Dabei sehen sich Unternehmen gezwungen, Fertigungsressourcen für mehrere Produktgenerationen sowie für unterschiedliche Produkte einzusetzen. Im Zuge dessen werden neue Produkte und Fertigungstechnologien zunehmend in existierende Produktionssysteme (Brownfields) integriert, um diese effizient zu betreiben. Somit avancieren Integrationen zur Hauptaufgabe der Planung. Ein zeitversetzter Marktstart verschiedener Produkte impliziert eine permanente Anlaufsituation der Produktion. All diese Effekte resultieren in einem steigenden Qualitätsanspruch an die Planung. Während der Absicherung produktionstechnischer Konzepte gewinnt Effizienz an Bedeutung. Die vorliegende Abhandlung erarbeitet in einem ersten Schritt Defizite etablierter Vorgehensweisen in der Phase Grundlagenermittlung und in der Interaktion zwischen verschiedenen Parteien. Ausgehend davon wird in einem zweiten Schritt eine innovative Methode entworfen, um die Planung von Integrationen zu verbessern. Die 3D-Digitalisierung mittels stationären 3DLaserscannern mit Foto-Funktion wird appliziert, um ein aktuelles geometrisches Modell eines bestehenden Produktionssystems aufzunehmen. Dies erfolgt unter dem Gebot hoher Effizienz und Genauigkeit. Die resultierende farbige Punktwolke dient als Modell für sämtliche nachfolgenden Schritte. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass das Modell von zahlreichen Disziplinen genutzt werden kann und dass die Disziplinen untereinander interagieren können. Im Anschluss an die Konzeption und Umsetzung der Methode erfolgt eine Validierung anhand realer Planungsfälle an Standorten weltweit. Zur Unterstützung wird ein informationstechnisches System konzipiert, das die Datenverwaltung und die Visualisierung leistet..
Hrsg.: Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2020, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 100, ISBN 978-3-8396-1583-6

**METHODE ZUR BESTIMMUNG DES GEFÄSSVERENGUNGSGRADES AUS DER PULSWELLENCHARAKTERISTIK AM BEISPIEL IMPLANTIERBARER SENSORIK FÜR DEN STENT**

**Domnich, Alexej**

Die vorliegende Dissertationsschrift stellt eine neuartige Messmethode zur Bestimmung des Gefäßverengungsgrades nach der Implantation von Gefäßstützen (Stents) vor. Das Messverfahren beruht auf der Erfassung und Auswertung des Pulswellenlaufzeitsignals. Bei jedem Herzschlag breiten sich über die Gefäße Pulswellen unterschiedlicher Geschwindigkeiten aus. Bei einer lokalen Gefäßverengung oder einem Anstieg der Gefäßsteifigkeit verändert sich die Pulswellenlaufzeit. Mit Hilfe einer implantierbaren, elektrisch passiven Sensorik und einem patentierten Messverfahren zur Bestimmung einer lokalen Pulswelle wird es möglich, die Änderung der Pulswellenlaufzeit in kurzen Zeitabständen zu detektieren und daraus den Gefäßverengungsgrad zu bestimmen. Das Messverfahren beruht auf der zeitlich periodischen Änderung der Druckverhältnisse in einer flexiblen Leitung, z.B. Blutgefäß. Die Sensoren bestehen aus zwei elektrisch und mechanisch entkoppelten Resonanzschwingkreisen. Jeder Sensor besteht dabei aus einem kapazitiven, druckempfindlichen Sensor und einer flachen kernlosen Spule. Die in die Blutgefäße implantierten Sensoren werden mit einem externen Magnetfeld induktiv gekoppelt und bis zur Resonanzfrequenz elektrisch angeregt. Verändern die kapazitiven Drucksensoren unter dem Einfluss der im Blutgefäß zeitlich fluktuierenden Pulswelle ihre elektro-mechanischen Eigenschaften, so ändern sich auch zeitlich versetzt die Resonanzfrequenzen der jeweiligen Sensoren. Im Erregersignal des extrakorporalen Magnetfeldes wird durch einen kurzfristigen Impedanzabfall die elektrische Veränderung der induktiv gekoppelten Resonanzschwingkreise der implantierten Sensoren messbar. Da der Abstand der beiden Sensoren zueinander im Blutgefäß durch die Anordnung auf dem Implantationsbesteck und durch den Implantationsvorgang bekannt ist, kann die Laufzeit der Pulswelle aus dem Verlauf des komplexen Widerstandes des Erregersignals der Ausleseeinheit bestimmt werden. Verändert die Pulswelle mit der Zeit ihre charakteristischen Eigenschaften, so ist diese Änderung u. a. auf die strukturelle Veränderung im Blutgefäß zurückzuführen. Die Pulswelle wird umso schneller, je steifer oder verengter das Gefäß wird. Durch die Detektion der Änderung der Pulswellengeschwindigkeit pro Zeiteinheit kann der Grad der lokalen Gefäßverengung berechnet werden. Hierzu wird der in dieser Arbeit entwickelte und implementierte modellgestützte Auswertealgorithmus herangezogen. Als Modellparameter werden die Elastizität der Gefäßwand, die Gefäßwanddicke, die Pulswellengeschwindigkeit und der Gefäßinnendurchmesser als zeitlich variable Größen berücksichtigt. Weitere Konstanten und Koeffizienten werden empirisch bestimmt oder aus der Literatur entnommen. Ein quantitativer Vergleich der durch das Modell generierten Berechnungen zur Bestimmung des

Gefäßverengungsgrades und der in vitro, am Versuchsstand, durchgeführten Messungen, liefert die Güte des Auswertealgorithmus. Das Messverfahren kann auf andere Anwendungsfelder übertragen werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die zu untersuchende physikalische Leitung ein endlich-periodisches zeitabhängiges Schwingungsverhalten aufweist und das pulsförmig beförderte Prozessmedium mit der Zeit zu Ablagerungen und somit zu Querschnittsveränderung im Inneren dieser Leitung führt. Auch strukturelle Veränderungen der Leitung, z.B. bedingt durch Materialermüdung oder Alterung, können mit dem vorgestellten Verfahren detektiert werden. Eine Anwendung im medizinischen Bereich wäre z.B. die Detektion von Aneurysmen im Blutgefäß.
Hrsg.: Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2020, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 114, ISBN 978-3-8396-1653-6

**ENTWURF PARTITIONIERTER NC-STEUERUNGEN ZUR AUSFÜHRUNG AUF MULTICORE-SYSTEMEN**

**Keinert, Matthias**

NC-Steuerungen werden in ihrer Funktionalität kontinuierlich erweitert und weiterentwickelt, um den Anforderungen neuer Anwendungsfälle gerecht zu werden und die Bearbeitungseffizienz und -qualität von Werkzeugmaschinen zu verbessern. Damit einher geht ein steigender Bedarf an Rechenleistung. Gleichzeitig besteht der Anspruch, dass die Kosten der unterlagerten Systemplattform nicht ansteigen. Mit Multicore-Prozessoren besteht eine Technologie, die in allen Bereichen der Computersysteme Einzug hält und auch für Embedded und Echtzeitsysteme an Bedeutung gewinnt. Die Multicore-Technologie kann den waschsenden Bedarf an Rechenleistung befriedigen und gleichzeitig den Anforderungen an die Kosten standhalten. Folglich ist der Einsatz von Multicore-Prozessoren für NC-Steuerungen aus technologischer und wirtschaftlicher Sicht erstrebenswert. Der effiziente Einsatz der Multicore-Technologie für spezifische Anwendungen ist maßgeblich davon abhängig, ob die verfügbare Leistung durch die auszuführende Software genutzt werden kann. Diese muss möglichst effizient auf die verfügbaren Prozessorkerne eines Multicore-Systems aufteilbar sein. Diesbezüglich weisen NC-Steuerungen ein Defizit auf. Speziell der NC-Kern, der maßgeblich für die Leistungsfähigkeit einer NC-Steuerung verantwortlich ist, weist nur ein geringes Potenzial für die parallele Ausführung auf einem Multicore-Prozessor auf. Die vorliegende Arbeit präsentiert deshalb einen Ansatz den NC-Kern in unabhängig voneinander ausführbare Teilaufgaben, sogenannte Tasks zu zerlegen und damit zu befähigen, die Leistungsfähigkeit von Multicore-Prozessoren auszunutzen. Dieser Partitionierungsansatz stützt sich auf Entwurfsmuster für parallele Systeme, einmal hinsichtlich der Zerlegung des NC-Kerns und dessen Funktionen in unabhängig ausführbare Tasks, zum anderen bezüglich der Koordination derselben. Zur Bewertung des Partitionierungskonzepts beschreibt diese Arbeit die Anwendung und damit spezifische Ausprägung der Partitionierung für ausgewählte Funktionen des NC-Kerns. Die nachgelagerte Analyse des Speedups und der Effizienz hinsichtlich der betrachteten Funktionen bestätigt, dass das vorgestellte Partitionierungskonzept für NC-Steuerung zielführend im Sinne einer Leistungssteigerung angewendet werden kann.
Hrsg.: Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2020, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 103, ISBN 978-3-8396-1602-4

**FERTIGUNGSTECHNISCHE SIMULATIONSMETHODEN FÜR MEDIZINISCHE ASSISTENZSYSTEME**

**Wohlfeld, Andreas**

In der medizinischen Diagnostik und Therapie werden immer häufiger Verfahren eingesetzt, die ausschließlich durch den Einsatz technischer Hilfsmittel realisierbar sind. Dabei wird zwischenzeitlich nicht mehr die vollständige Automatisierung von Abläufen in diesem Bereich angestrebt; stattdessen werden zunehmend kooperative Ansätze verfolgt, die die jeweiligen Stärken von Mensch und technischem System über sogenannte Assistenzsysteme zu vereinen versuchen. Sowohl für die Entwicklung als auch im Umfeld der Nutzung dieser Assistenzsysteme wird vermehrt Simulation in unterschiedlichen Ausprägungen eingesetzt. Aufgrund der zunehmenden Komplexität sowohl der medizinischen Verfahren als auch der technischen Systeme zu deren Unterstützung nimmt dieser Simulationseinsatz weiter zu. Dabei bestehen jedoch Defizite, z.B. im Bereich der Durchgängigkeit der eingesetzten Simulationssysteme über die verschiedenen Lebensphasen der Assistenzsysteme hinweg. Zu den besonderen Anforderungen der Simulation von Assistenzsystemen zählt zudem nicht zuletzt eine Simulation in Echtzeit. Diese Arbeit zeigt unter Nutzung von Parallelen zwischen Medizin- und Fertigungstechnik einen Lösungsansatz dieser Defizite durch den durchgängigen Einsatz von Simulationsmethoden nach fertigungstechnischem Vorbild für medizinische Assistenzsysteme auf. Dabei werden die Assistenzsysteme auf der Basis etablierter industrieller Steuerungstechnik aufgebaut und ein systemunabhängiger Ansatz entwickelt, der die Integration von Peripheriekomponenten aus anderen Anwendungsbereichen als der Fertigungstechnik in derartige Assistenzsysteme ermöglicht.
Hrsg.: Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2020, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 112, ISBN 978-3-8396-1637-6

## 2021

**PROTOTYPBASIERTES SKILL-MODELL ZUR PROGRAMMIERUNG VON ROBOTERN FÜR KRAFTGEREGELTE MONTAGEPROZESSE**

**Nägele, Frank**

Ausgehend von der Motivation, den Einsatz von Industrieroboter für Montageanwendungen zu erleichtern, wird in dieser Arbeit ein Skill-Modell zur Programmierung kraftgeregelter Montageprozesse konzipiert und demonstriert. Klassische Positions- und Bahnsteuerungen zielen auf das sequenzielle Anfahren abgespeicherter Zielpositionen mit hoher Geschwindigkeit und Wiederholgenauigkeit ab. Sie stoßen jedoch bei vielen Montageprozessen an ihre Grenzen, die stattdessen eine definierte Regelung der Fügekräfte erfordern und eine große Anzahl von Produktvarianten abdecken müssen. Skill-basierte Methoden wie der in dieser Arbeit verwendete iTaSC Formalismus erlauben es hingegen, Positions-, Geschwindigkeits- und Kraftregelung zu vereinen und durch eine werkstückzentrierte Modellierung Programme leicht an Varianten anzupassen. Es stellt sich allerdings die Frage, wie auf Basis eines solchen Formalismus eine umfangreiche Skill-Bibliothek erstellt werden kann, mit deren Skills sich eine große Vielzahl an Montageprozessen effizient realisieren lässt. Das vorgestellte pitasc Skill-Modell wird daher als Baukastensystem entworfen. Die elementaren Bausteine, aus denen sich Skills zusammensetzen, werden in die Teilaspekte Hardwareabstraktion, kinematische Modellierung, Aufgabenspezifikation mit Reglern und Stoppbedingungen sowie Koordination der einzelnen Skills mittels Statecharts aufgeteilt. Da jeder Baustein nur einen der Teilaspekte modelliert, wird seine Wiederverwendung erleichtert. Um nicht jeden Skill von Grund auf neu zusammensetzen und parametrieren zu müssen, können Skills mittels Komposition und prototypbasierter Vererbung auf bestehenden Skills aufbauen und diese wiederverwenden und erweitern. Die Modellierung erfolgt dabei in einem generischen Parameterbaum, der es erlaubt, die Methoden der Parametrierung, Komposition und Vererbung auf alle Arten von Parametern gleichermaßen anzuwenden – vom einfachen String über Bausteine und Skills bis hin zu ganzen Anwendungen. Zur einfachen Modellierung wird eine domänenspezifische Sprache vorgestellt. Anhand von zehn exemplarischen Montageanwendungen wird gezeigt, dass bereits eine kleine Anzahl an Skills die Basis für eine Vielzahl von industriellen Anwendungsfällen bilden kann und es sehr einfach ist, weitere Skills mittels vorhandener Bausteine zu erstellen. Die erreichbare Robustheit wird ebenso untersucht wie die Abbildung von Produktvarianten über Parameter und die Unabhängigkeit der Skills von den eingesetzten Robotern, Sensoren und Greifern.
Hrsg.: Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2021, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 121, ISBN 978-3-8396-1719-9

**WANDELBARE, ECHTZEITFÄHIGE KOMMUNIKATIONSINFRASTRUKTUR FÜR CYBER-PHYSISCHE PRODUKTIONSSYSTEME**

**Prinz, Frederick**

Heutzutage agieren Unternehmen in einem immer volatileren Umfeld mit einem unmittelbaren Einfluss auf die Produktionssysteme. Um die Wandelbarkeit von zukünftigen Produktionssystemen zu verbessern wird daher eine Automation basierend auf Cyber-Physischen Systemen (CPS) angestrebt. Diese CPS-basierte Automation zeichnet sich durch eine einheitliche, wandelbare und echtzeitfähige Kommunikationsinfrastruktur aus. Stand heute existieren verschiedene Lösungsansätze mit unterschiedlichen Technologien zur Etablierung einer echtzeitfähigen Kommunikationsinfrastruktur. Diese Lösungen erfüllen allerdings die Anforderungen an eine zukünftige Kommunikationsinfrastruktur nur teilweise und stellen daher keine ganzheitliche Lösung dar. Insbesondere der Aspekt der Wandelbarkeit mit einer dynamischen Konfiguration von Echtzeitverbindungen zur Laufzeit wird heutzutage nur bedingt unterstützt. Dadurch wird die Vision einer CPS-basierten Automation und die Wandelbarkeit von zukünftigen Produktionssystemen allgemein eingeschränkt. Als Grundlage für eine CPS-basierte Automation wird in dieser Arbeit eine wandelbare, echtzeitfähige Kommunikationsinfrastruktur für zukünftige Produktionssysteme vorgestellt. Diese Kommunikationsinfrastruktur ermöglicht eine deterministische Kommunikation mit geringer Latenz und erfüllt die harten Echtzeitanforderungen in Produktionssystemen. Gleichzeitig wird die dynamische Konfiguration von Echtzeitverbindungen zur Laufzeit ermöglicht. Mit dem Fokus auf einer ganzheitlichen Lösung basiert die vorgestellte Kommunikationsinfrastruktur auf den drei wesentlichen Aspekten: Echtzeitkommunikation, Parametrierung und Netzwerkkonfiguration. Die Echtzeitkommunikation basiert auf der neuen IEEE Technologie Time-Sensitive Networking (TSN, IEEE 802.1). TSN ermöglicht eine einheitliche, herstellerunabhängige Kommunikationsbasis für den echtzeitkritischen und bestmöglichen Datenverkehr im Netzwerk. Dazu werden die erforderlichen TSN Mechanismen in die echtzeitfähigen Assets integriert und in einem TSN SDK (Software Development Kit) zusammengefasst. Zur einheitlichen Parametrierung der Echtzeitkommunikation wird das Konzept der echtzeitfähigen I4.0 Komponente vorgestellt. Das neue Konzept beschreibt ein echtzeitfähiges Asset mit einer sogenannten Verwaltungsschale, d.h. einer virtuellen digitalen Repräsentanz des Assets. Diese Verwaltungsschale spezifiziert die individuellen Fähigkeiten des Assets und beinhaltet zusätzliche Konfigurationsparameter für die Echtzeitkommunikation. Zur automatischen Konfiguration der Echtzeitverbindungen im Netzwerk wird ein zentraler SDN (Software-defined Networking) Controller erweitert. Dieser Controller etabliert dynamische, redundante und komplexe TSN Verbindungen zwischen verschiedenen echtzeitfähigen Assets zur Laufzeit. Dabei werden sowohl die TSN Switches in der Netzwerkinfrastruktur als auch die echtzeitfähigen Assets konfiguriert. Schließlich wird die Machbarkeit der neuen wandelbaren, echtzeitfähigen Kommunikationsinfrastruktur durch eine prototypische Implementierung gezeigt. Darauf aufbauend wird die Performance des neuen TSN SDKs evaluiert und die Integration ins Engineering beschrieben.
Hrsg.: Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2021, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 125, ISBN 978-3-8396-1743-4

**ENTWICKLUNG EINES THERMOGRAFISCHEN VERFAHRENS ZUR DEFEKTDETEKTION BEI EISENBAHNRÄDERN**

**Getto, Sascha**

Der Schienenverkehr ist nach wie vor eine der wichtigsten Transportarten weltweit. Auch für die Zukunft wird ein nach wie vor starkes Wachstum dieses Sektors erwartet. Die hierdurch steigenden Passagier- sowie Gütertransportzahlen mit dem damit verbundenen Anstieg der Schienenfahrzeuge und deren Fahrleistungen erfordern jedoch auch die Beschäftigung mit sicheren, zuverlässigen und leistungsfähigen Prüftechnologien, vor allem für sicherheitskritische Komponenten. Der Radsatz und das Rad selbst sind solche Schienenfahrzeugkomponenten, welche durch Defekte Ursache für gravierende Unfälle sein können. Für die Prüfung dieser Bauteile stehen seit langem verschiedene Methoden, mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen, zur Verfügung. Die Radoberfläche, mit Defekten wie beispielsweise Rissen auf der Radlauffläche, werden heute größtenteils mit Hilfe der Magnetpulverprüfung untersucht. Diese etablierte Methode bringt jedoch einige Nachteile mit sich, wie einen im Allgemeinen großen, platzgreifenden Prüfaufbau, eine aufwendig durchzuführende Prüfung und eine schwierige Automatisierbarkeit. Entwicklungen der letzten Jahre bei den Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung haben hierzu Alternativen hervorgebracht, welche eine effizientere und leistungsstärkere Bearbeitung dieser Prüfaufgabe ermöglichen könnten. Eine dieser neuen Prüfverfahren ist die induktiv angeregte Thermografie. In dieser Arbeit wird ein, auf diesem Verfahren aufbauendes, modernes Prüfsystem für die Radprüfung bei Schienenfahrzeugen entwickelt. Dieses soll mindestens die gleiche Leistung im Bezug auf Defektdetektionsraten wie die Magnetpulverprüfung aufweisen, bei gleichzeitig verbesserter Mobilität, Einsetzbarkeit in unterschiedlichen Prüfszenarien und kürzerer Prüfzeit. Die Entwicklung soll in einem prototypischen Demonstrator seine Umsetzung finden, um das Verfahren für eine zukünftige industrielle Anwendung vorzubereiten und dem zu erwartenden größeren Bedarf an Radprüfungen in Produktion und Wartung zu begegnen.
Hrsg.: Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2021, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 131, URL: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-ds-118248

**KONZEPTION, KONSTRUKTION UND EVALUIERUNG EINER DREIACHSKINEMATIK ALS KOPF- UND TORSOGELENK EINES SERVICEROBOTERS**

**Fröhlich, Tim**

Die Entwicklung von Servicerobotern für das häusliche Umfeld und den Umgang mit Menschen stellt ein ganze Reihe von Anforderungen, die bei industriellen Robotern nicht relevant sind. Durch das Format des Menschen und der daraus folgenden Gestaltung der Umgebung, ergibt sich auch für einen Serviceroboter das er eher hoch als breit ist und der Arbeitsraum der Manipulatoren und Sensoren den gesamten Bereich um den Roboter abdecken muss. Herausforderungen dabei sind, das statische Gleichgewicht zu bewahren, Kräfte und Momente in den Achsen aufzunehmen zu können, den geringen verfügbaren Bauraum maximal zu nutzen und den Roboter sicher für den Nutzer zu gestalten. Darüber hinaus muss ein Roboter auch in Formsprache und Bewegung den Nutzer ansprechen und darf keine Angst auslösen. In dieser Arbeit wird eine Achsanordung als Torso und Kopfgelenk vorgeschlagen, welche auf diese Anforderungen ausgelegt ist. Die ähnlich zu einem Kugelgelenk ausgeführte Kinematik vereint die Möglichkeit den Arbeitsraum von Manipulatoren und Sensoren ausreichend zu erweitern, ist besonders bauraumsparend und durch ihren Aufbau intrinsisch sicher. Zudem sind in den beiden häufigsten Positionen die Antriebe lastfrei, was wertvolle Energie auf einem mobilen System spart. Es werden die Herleitung der Gelenkanordnung, die mathematische Beschreibung, die Grenzen der Kinematik und die Integration in den Serviceroboter \cobv beschrieben. Auch weitere Anwendungen werden angesprochen.
Hrsg.: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2021, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 127, URL: http://dx.doi.org/10.18419/opus-11731

**MODEL SELECTION AND PARAMETER OPTIMIZATION FOR CABLE-DRIVEN PARALLEL ROBOTS**

**Miermeister, Philipp Reinhard**

Parallele Seilroboter sind vielseitige Robotersysteme, die skaliert und rekonfiguriert werden können, um den spezifischen Anforderungen verschiedenster Anwendungen gerecht zu werden. Während unterschiedliche Modelle, Berechnungsmethoden und Parameteridentifikationsschemata in der Seilroboterliteratur zu finden sind, fehlt bisher eine systematische Analyse des Modellauswahlprozesses für Seilroboter. Die Frage nach dem optimalen Modell für eine bestimmte Anwendung kann nur durch eine gleichzeitige Betrachtung der Modellstruktur zusammen mit seiner optimalen Parametrisierung gezeigt werden. Dies muss im Kontext eines eigenständigen physikalischen Robotermodells erfolgen, der auch diejenigen physikalischen Eigenschaften einbezieht, die im Kontrollmodell nicht vorhanden sind. In dieser Arbeit wird die Wirkung verschiedener Modellierungsannahmen für die Analyse der Genauigkeit der Positionsverfolgung und des Arbeitsbereichs mit Hilfe eines Meta-Modells untersucht. Mit Schwerpunkt auf den sicherheitskritischen Echtzeit-Anwendungen, stellt sich die eingeschränkte Modellkomplexität für einen zuverlässigen und sicheren Betrieb als unerlässlich dar. Am Anfang der hier gezeigten Arbeit stehen die Kinematikmodelle, die als Mindestanforderung für die Steuerung von Seilrobotern zu betrachten sind. Durch schrittweise Erhöhung der Modellkomplexität hin zu einem elastostatischen Modell, wird ermöglicht den inneren Spannungszustand abzubilden, der einem überbestimmten Seilroboter inhärent ist. Die Kombination von Modellierung und Parameteroptimierung in der Analyse zusammen mit einem physikalischen Referenzmodell erlaubt es, die optimale Leistung abzuschätzen, die für eine bestimmte Modellklasse erreichbar ist. Dies ermöglicht fundierte Entscheidungen auf der Grundlage der geschätzten Leistung zu treffen. Die experimentelle Analyse und Validierung der Modelle erfolgt auf dem Cable-Robot-Simulator, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Die Ergebnisse zeigen den Vorteil der gleichzeitigen Modellerstellung und Optimierung, welcher durch den Vergleich von optimierten Modellen und einem Nominalmodell erhalten wird. Mit diesem Ansatz kann die Genauigkeit eines nominalen Modells mit einem mittleren Positionsfehler von 39,8 mm und mittlereren Rotationsfehler von 1,19 Grad auf einen mittleren Positionsfehler von 2,73 mm und Rotationsfehler von 0,11 Grad für ein optimales elastostatisches Modell verbessert werden. Kraftvorhersagen für das elastostatische Modell wurden von 2426 N für das nominale Modell auf 582 N für das optimale Modell für einem Gesamtkraftbereich von 9000 N verbessert. Da der CableRobot-Simulator als höchst repräsentativ für Seilroboter bzgl. Architektur, Maßstab, Genauigkeit und Sicherheitsanforderungen anzusehen ist, sollten die Ergebnisse aus dieser Arbeit gut auf andere Systeme dieser Klasse übertragbar sein.
Hrsg.: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2021, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 128, URL: http://dx.doi.org/10.18419/opus-11732

## 2022

**ENTWICKLUNG UND ANALYSE NACHGIEBIGER PNEUMATISCHER DREHANTRIEBE**

**Stoll, Johannes T.**

Für den Antrieb kollaborativer Knickarmroboter stellen pneumatische Antriebe eine Alternative zu den bewährten elektrischen Antriebseinheiten dar. In der vorliegenden Arbeit wird zunächst hergeleitet, welche charakteristischen Eigenschaften pneumatische Drehantriebe für den Einsatz in kollaborativen Knickarmrobotern haben sollten (servopneumatisch positionierbar, nachgiebig, endlos drehbar). Nach einem Überblick zum Stand der Technik werden drei mechanische Antriebskonzepte vorgestellt, in denen jeweils ein mechanisches Funktionsprinzip mit geeigneten Aktoren kombiniert wird. Im ersten Antriebskonzept werden pneumatische Faltenbälge in Kombination mit dem mechanischen Funktionsprinzip einer Schubkurbel bzw. Kurbelwelle eingesetzt. Das zweite Antriebskonzept nutzt eine Taumelscheibe, um die Zugkraft pneumatischer Muskeln zu wandeln und eine endlose Drehung der Welle zu bewirken. Neu entwickelte Aktoren aus Feuerwehrschlauch - die sogenannten Fire-Hose-Actuators - kommen im dritten Antriebskonzept zum Einsatz. Die Aktoren üben darin eine Druckkraft auf den exzentrischen Teil der Antriebswelle aus. Es wird erneut das Funktionsprinzip einer Schubkurbel genutzt. In der Modellbildung wird ein allgemeines, parametrierbares Modell für den Länge-Druck-Kraft-Zusammenhang der Aktoren präsentiert und für alle Drehantriebe ein Modell des statischen Drehmoments hergeleitet. Darüber hinaus wird eine Theorie entwickelt, die für endlos drehbare Antriebe bereits in der Entwurfsphase eine grobe Abschätzung des maximal kontinuierlich verfügbaren Drehmoments anhand weniger Eingangsparameter liefert. In der Evaluation wird die statische Drehmomentverteilung aller Drehantriebe gemessen. Alle Drehantriebe sind endlos drehbar und verfügen über eine einstellbare Steifigkeit. Das maximal kontinuierlich verfügbare Drehmoment der Antriebe kann mit 4,3 Nm, 17,6 Nm und 63,1 Nm angegeben werden. Eine servopneumatische Positionierung ist mit allen Drehantrieben möglich.
Hrsg.: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2022, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 146, URL: http://dx.doi.org/10.18419/opus-12611

**HEURISTISCHES SUCHVERFAHREN FÜR DIE EFFIZIENTE PLANUNG ZUM GREIFEN UNGEORDNET GELAGERTER WERKSTÜCKE MIT INDUSTRIEROBOTERN**

**Spenrath, Felix**

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine effiziente Greifplanung für die modellbasierte Entnahme von Werkstücken durch einen Industrieroboter entwickelt, die insbesondere beim sogenannten Griff-in-die-Kiste zum Einsatz kommen kann. Das Verfahren basiert auf einem Suchbaum, der so konstruiert wird, dass alle relevanten Aspekte der Greifplanung enthalten sind, und der alle potenziell möglichen Griffe enthält. Kriterien, die einen erfolgreichen Griff verhindern können, werden beim Expandieren des Suchbaums überprüft, so dass jeder Zielknoten einen durchführbaren Entnahmevorgang repräsentiert. Diese Prüfungen beinhalten beispielsweise Kollisionstests basierend auf einer Punktwolke der aktuellen Szene, um einen kollisionsfreien Griff gewährleisten zu können. Um trotz des großen Suchraums eine kurze Rechenzeit zu erreichen, kommt bei der Expansion des Suchbaums ein heuristisches Suchverfahren zum Einsatz. Die für das Suchverfahren verwendete Heuristikfunktion wird dabei so definiert, dass sie auf Basis diverser Eigenschaften eines Knotens die Wahrscheinlichkeit abschätzt, unter den Nachfolgern dieses Knotens eine Greiflösung zu finden. Um eine Aussage darüber zu treffen, von welchen Eigenschaften die Wahrscheinlichkeit einer geeigneten Greiflösung abhängt, werden in dieser Arbeit einige Eigenschaften verschiedener Komponenten analysiert. Zudem wird in dieser Arbeit die Verwendung von künstlichen neuronalen Netzen in der Heuristikfunktion untersucht. Die neuronalen Netze lernen dabei, welche Knoten des Suchbaums expandiert werden sollten, um möglichst schnell eine Lösung zu finden. Die in der Heuristikfunktion enthaltenen Gewichtungsfaktoren werden durch Optimierungsverfahren bestimmt. Zum Abschluss

wird die in dieser Arbeit entwickelte Greifplanung anhand zweier Versuchsaufbauten experimentell untersucht. Zudem wird durch die Auswertung von über 1,5 Mio. Griffen einer industriellen Anwendung gezeigt, dass die entwickelte Greifplanung für die Praxis geeignet ist.
Hrsg.: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2022, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 137, URL: http://dx.doi.org/10.18419/opus-12612

**RADARBASIERTE TERRAINERFASSUNG ZUR VORAUSSCHAUENDEN STEUERUNG AKTIVER PROTHESEN DER UNTEREN EXTREMITÄTEN**

**Kleiner, Bernhard**

In dieser Arbeit wird das Thema der Anpassung aktiver Prothesen der unteren Extremitäten bei verschiedenen Untergründen behandelt. Bisherige Systeme werden auf Basis von Bewegung und Bodenreaktionskraft gesteuert und sind deswegen nicht für eine terrainabhängige Steuerung von Gelenkwinkeln und -momenten vor dem Betreten des Untergrunds geeignet. Dies ist für einen Komfort- und Sicherheitsgewinn jedoch notwendig. Daher wird in der vorliegenden Arbeit ein mobiles, radarbasiertes Messsystem vorgestellt, dass das vorliegende Terrain während der Bewegung erfasst und das Potenzial für eine vorausschauende Steuerung unter realen Einsatzbedingungen bietet. Damit wird die bisher fehlende visuelle Rückkopplung an den Bewegungsapparat durch den Menschen in Teilen kompensiert. Teil der Entwicklung ist ein Verfahren zur zweidimensionalen Kartierung der Umgebungsstruktur. Mittels Inertialsensorik wird die Bewegung rekonstruiert und aus den synchron erfassten Radar-Entfernungsmessdaten wird ein 2D-Scan in der Sagittalebene errechnet. Es wurden Messergebnisse relevanter Terrain-Übergänge exemplarisch untersucht und Hypothesen für die Rekonstruktion der Umgebungsstruktur aufgestellt. Auf dieser Basis wurde ein Verfahren zur Vereinzelung von Umgebungsstrukturen im Radarscan entwickelt. Die Erfassung markanter Ortsmerkmale ermöglichen eine Dimensionierung von Stufen, Treppen und Rampen. Ergebnisse aus einer Probandenstudie sowie aus Labormessungen zeigen Potential und Ausblick des Ansatzes und führen zu grundlegenden Erkenntnissen zum Einsatz des entwickelten radarbasierten Messsystems.
Hrsg.: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2022, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 148, URL: http://dx.doi.org/10.18419/opus-12567

**3D TEXTURANALYSE VON COMPUTERTOMOGRAPHIE-DATEN FÜR DIE AUTOMATISIERTE QUALITÄTSKONTROLLE VON FASERVERSTÄRKTEN KUNSTSTOFFEN**

**Frommknecht, Andreas**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Qualität von Faserverbundkunststoffen (FVK). FVK sind Leichtbaumaterialien, die sich durch eine hohe Steifigkeit und Festigkeit auszeichnen. Aufgrund dieser Eigenschaften werden sie oft in sicherheitskritischen Bereichen eingesetzt, welche umfassende zerstörungsfreie Prüfmethoden erfordern. In der Arbeit wird dargelegt, dass die röntgenbasierte industrielle Computertomographie (CT) unter den zerstörungsfreien Prüfmethoden die umfangreichsten Informationen liefert. Es wird auf verschiedene geeignete CT-Auswertemethoden insbesondere zur Erkennung von Defekten und der Analyse der Faserorientierung eingegangen. Anhand der jeweiligen Schwächen dieser Verfahren wird die zu lösende Problemstellung abgeleitet. Die in der zweidimensionalen Bildverarbeitung weit verbreitete Texturanalyse stellt sich hierbei als geeignete Basis heraus, diese Probleme zu adressieren. Allerdings ist ein zweidimensionales Verfahren nicht ausreichend, um die komplexe dreidimensionale Struktur von FVK zu erfassen. Deshalb wird in der Arbeit eine neu entwickelte 3D Texturanalyse vorgestellt, die sowohl in der Lage ist Defekte zu erkennen, als auch Faserorientierungen zu bestimmen. Auch quantitative Informationen, wie die Defektposition und größe, sind aus den erzielten Ergebnissen des entwickelten Verfahrens ableitbar. Die in C++ implementierte 3D Texturanalyse zeigt bei der systematischen Untersuchung der Leistungsfähigkeit hinsichtlich Defekterkennung und Bestimmung der Faserorientierung gute Auswertungsergebnisse. Die Laufzeit des Verfahrens kann aufgrund der großen zu verarbeitenden Datenmenge bei der Computertomographie von wenigen Minuten auf über eine Stunde ansteigen. Hier sind weitere Optimierungen notwendig. Allgemein zeigt diese Arbeit, dass das umgesetzte Verfahren, nur durch Änderung der Parametrierung, sowohl zur Analyse der Struktur in Form der Faserorientierung, als auch zur Defekterkennung geeignet ist.
Hrsg.: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2022, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 141, URL: http://dx.doi.org/10.18419/opus-12481

**ÜBERWACHTER BIDIREKTIONALER DATENAUSTAUSCH IN INDUSTRIELLEN ECHTZEIT-KOMMUNIKATIONSARCHITEKTUREN**

**Eckhardt, Andreas**

Industrie 4.0 fordert eine durchgängige Vernetzung aller Ebenen der Automatisierungspyramide. Dies ist eine große Chance und eine Herausforderung für die Feldebene, da dort bisher eine Vielzahl von Bussystemen eingesetzt wird, die untereinander nicht kompatibel sind. Um auch hier eine durchgängige Kommunikationslösung zu bieten, engagieren sich viele Hersteller von Automatisierungslösungen bei dem neu entstehenden Kommunikationsstandard OPC Field Level Communication (OPC FLC). OPC FLC basiert auf Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) und TSN. Um die Anforderungen der Feldebene zu erfüllen, wurde OPC UA um die entkoppelte Kommunikation OPC UA Publish Subscribe (OPC UA PubSub) erweitert. OPC UA PubSub wurde im Jahr 2018 veröffentlicht und ist dementsprechend noch ein neuer Standard, der nach und nach erweitert wird. Dadurch dass OPC UA PubSub auf einer entkoppelten Kommunikation basiert, sind die kommunizierenden Entitäten einander unbekannt. Damit die überlagerte Applikation jedoch auf Unregelmäßigkeiten bei der Kommunikation reagieren kann, ist eine gewisse Überwachung nötig. Bislang unterstützt OPC UA PubSub nur die Überwachung des Datenaustauschs auf Seiten des Subscribers. Dem Publisher ist nicht bekannt, ob seine Nachrichten bei den gewünschten Entitäten ankommen.
Es fehlt eine Überwachung des Datenaustauschs beim Publisher. An dieser Stelle knüpft diese Arbeit an.
Hrsg.: Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2022, Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau; 8, URL: http://dx.doi.org/10.18419/opus-12392

**METHODIK FÜR EINE GANZHEITLICHE TESTAUTOMATISIERUNG BEIM SYSTEMTEST VON AUTOMATISIERTEN FERTIGUNGSSYSTEMEN**

**Kübler, Karl**

Seit Jahrzehnten wird daran entwickelt und geforscht, den Automatisierungsgrad von Fertigungssystemen zu erhöhen. Im Trend steigender und intelligenterer Automatisierung ergibt sich der Effekt von deutlich mehr softwarebasierten Lösungen. Der höheren Dynamik beim Entwickeln und Nachbessern an der Software steht ein steigender Aufwand zur Qualitätssicherung gegenüber: Komplexere Testabläufe und größere Datenmengen bedeuten einen gestiegenen Testumfang bei gleichzeitig höherer Frequenz an Testdurchführungen. Diese Tendenzen machen eine hohe Testabdeckung und eine hohe Testtiefe mittels manueller Testprozesse unmöglich. In dieser Arbeit wird eine ganzheitliche Testautomatisierung entwickelt, um den Testprozess für Fertigungssysteme zu verbessern. Zielgröße ist die Schnittmenge aus hoher Aussagekraft der Testergebnisse und geringem Aufwand bei der Anwendung der neuen Testmethodik. Anhand zweier Validierungsszenarien werden Verbesserungen zum bisherigen Testprozess ermittelt. Quantitativ verkürzt die Methodik die Zeitdauer bei der Testdurchführung mit einem Testwerkzeug um ca. 45 %. In einem Systemtestszenario wurde der Gesamtaufwand mit Testentwurf und -abschluss um ca. 95% gesenkt.
Hrsg.: Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2022, Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau; 9, ISBN: 978-3-8396-1817-2

**REGLERSYNTHESE FÜR AUFGABENRAUMGESTEUERTE INDUSTRIEROBOTER**

**Halt, Lorenz**

Die Motivation der vorliegenden Dissertation ist es, ein performantes sowie roboter- und kinematikneutrales Steuerungsrahmenwerk für roboterbasierte Montage zu schaffen. Dieses Rahmenwerk soll einfach zu programmieren sein und die Möglichkeit aufweisen, Programme zwischen Robotern zu übertragen. Hierfür wurde eine skillbasierte Programmierung mit dem iTaSC Formalismus kombiniert. Darauf aufbauend wurden als Hauptteil dieser Arbeit Reglerstrukturen entwickelt, die sich ohne Zutun des Programmierers eigenständig parametrisieren und sich somit automatisch an den eingesetzten Roboteraufbau anpassen. Für kontaktfreie Bewegungen des Roboters wurde ein modellbasierter Regelungsansatz ausgewählt. Zunächst wird ein lineares Modell angenähert und zur automatischen Synthese einer dynamischen Ausgangsrückführung eingesetzt. Das Verfahren ermöglicht nahezu zeitoptimales Verhalten unter Berücksichtigung von Stellgrößenbegrenzungen. Für die Kontakt- und Kraftregelung wurde ein modellfreier Ansatz verfolgt. Hierbei wird die Reglerverstärkung basierend auf den aktuellen Regelungsfehler so adaptiert, dass sich ein Regelfehlerverlauf innerhalb vorgegebener Performanzgrenzen ergibt. Die Regelungsansätze wurden einzeln in Simulationen verifiziert, in das iTaSC basierte Rahmenwerk eingefügt und jeweils mit verschiedenen Szenarien und Robotern experimentell erprobt. Es ergeben sich sowohl neue Einblicke in die Verhalten der einzelnen Technologien, als auch in das Zusammenspiel der Komponenten des dargestellten Steuerungsrahmenwerks. Beide Regelungsansätze ermöglichen hohe Regelgüte und große Übertragbarkeit für komplexe Roboterbewegungen bei Montageaufgaben. Die Ansätze benötigen keine manuellen Anpassungen und ermöglichen so die Programmierung durch Prozessexperten ohne tiefere Kenntnisse der Regelungstechnik.
Hrsg.: Fraunhofer IPA, Stuttgart, 2022, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 136, URL: http://dx.doi.org/10.18419/opus-12255

**ARCHITEKTUR FÜR EINEN VERZEICHNISDIENST IN DER SERVICEORIENTIERTEN PRODUKTIONSTECHNIK**

**Kretschmer, Felix**

In dieser Arbeit wird eine Architektur entworfen, welche den Bedürfnissen einer serviceorientierten Produktionstechnik gerecht wird und einen Verzeichnisdienst bereitstellt, der unter Adaption serviceorientierter Architekturen den Schulterschluss von IT und OT ermöglicht. Hierfür werden zunächst verfügbare Technologien und Lösungen verglichen. Durch die weite Verbreitung von Verzeichnisdiensten in der IT existieren bereits zahlreiche Lösungen, welche sich mit sehr unterschiedlichem Erfolg durchgesetzt haben. In der OT hingegen existieren bisher keine vergleichbaren Lösungen, dennoch stehen standardisierte Technologien zur Verfügung, welche die Funktionalität eines Verzeichnisdienstes erfüllen können. Auf Basis von OPC UA wird ein Verzeichnisdienst entworfen, welcher Fähigkeiten und Schnittstellen von cyber-physischen Systemen im Produktionsumfeld bereitstellt. Dies erfolgt über die Abbildung der Daten in Informati-

onsmodellen, welche auf LDAP-Verzeichnisse in der Office-IT synchronisiert werden können.
Hrsg.: Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2022, Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau; 1, ISBN: 978-3-8396-1789-2

**VERTEILTE INTERPOLATION : BEWEGUNGSSYNCHRONISIERUNG IN DEZENTRAL GESTEUERTEN MEHRACHSSYSTEMEN**

**Dripke, Caren**

Integrierte Miniatursteuerungen sind Technologiebefähiger für Industrie 4.0. Die Verwendung solcher Steuerungen in Automatisierungskomponenten ermöglicht es, diese als intelligente Elemente in Fertigungsstationen und -zellen einzusetzen. Solche intelligenten Komponenten bieten ihre Funktionen über das Produktionsnetzwerk an und können, kombiniert mit weiteren Automatisierungskomponenten, auch höherwertige Funktionen realisieren. Ein Spezialfall der dezentralen Ansteuerung mit solchen höherwertigen Funktionen ist die gemeinsame synchronisierte Bewegung von positionierenden Automatisierungskomponenten. In klassischen Automatisierungssystemen wird diese Aufgabe meist von einer zentralen Bewegungssteuerung berechnet, koordiniert und durchgeführt. In dieser Arbeit wird betrachtet, welche alternativen Systemarchitekturen zur Interaktion zwischen den Miniatursteuerungen geeignet sind, um eine verteilte Bewegungssteuerung umzusetzen. Die agentenbasierte Systemarchitektur wird in dieser Arbeit von anderen Ansätzen abgegrenzt, daraus folgende Anforderungen betrachtet und geeignetes Agentenverhalten abgeleitet.
Hrsg.: Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2022, Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau; 4, ISBN: 978-3-8396-1810-3

**ONLINE-BAHNPLANUNG FÜR MEHRERE FLUGROBOTER IN VERÄNDERLICHER UMGEBUNG MITHILFE DER KURVENFLUSSMETHODE**

**Huptych, Marcel**

Um für zukünftige Produktionslinien eine möglichst hohe Flexibilität zu ermöglichen, wird für den Kleinteiletransport aktuell der Einsatz unbemannter Flugfahrzeuge (UAVs, engl. unmanned aerial vehicles) untersucht. Gegenüber boden- und liniengebundenen und häufig starren Materialflusseinrichtungen bieten UAVs die Möglichkeit den meist ungenutzten Luftraum innerhalb der Produktionsstätten auszunutzen. Um dem hohen Kollisionspotenzial, welches dabei durch parallele und unabhängige Flugbewegungen entsteht, zu begegnen, wird im Rahmen dieser Arbeit mit der Kurvenflussmethode (KFM) eine neue Bahnplanungsmethode entworfen. Auf Basis eines in Echtzeit aktualisierten Umgebungsmodells werden die Flugbahnen durch Aufprägung virtueller Kräfte zur Laufzeit derart an den aktuellen Umgebungszustand angepasst, dass sie stets um statische (z.B. Gebäudeelemente, Versorgungsleitungen) sowie dynamische (z.B. weitere UAVs) Hindernisse herumführen. Obgleich die in der mobilen Robotik eingesetzte Elastic-Bands-Methode (EBM) ein der KFM ähnelndes Funktionsprinzip besitzt, konnten in einer Voruntersuchung einige Schwächen der EBM identifiziert werden. Diese betreffen vorwiegend die begrenzte numerische Stabilität sowie die abstrakte Parametrierung der EBM und werden durch die KFM behoben. Dazu wird die KFM zunächst als verallgemeinerte Bahnplanungsmethode theoretisch hergeleitet. Eine systemtheoretische Analyse des Bahnverhaltens ermöglicht die Herleitung der Kenngrößen für die Parametrierung der KFM anhand physikalischer Größen. Ein abschließender Vergleich zeigt folgende signifikante Vorteile der KFM gegenüber der EBM: Numerisch stabile Lösbarkeit, analytische Parametrierbarkeit, Skalierungsunabhängigkeit sowie eine etwas höhere Recheneffizienz. Losgelöst von der EBM werden anschließend weitere Steuerungsfunktionen, welche für die Anwendung der KFM auf die Problemstellung (parallele Bewegungsführung mehrerer UAVs) benötigt werden, erläutert. Dazu zählen z.B. Hindernis- und Arbeitsraummodellierung, Initialisierung, Bahninterpolation sowie Start- und Landemanöver. Abschließend werden mehrere parallel ausgeführte Instanzen der KFM auf jeweils eigenen Industriesteuerungen, welche über eine lokale Cloud vernetzt sind, in Betrieb genommen. Die KFM wird dabei als eigene (kollisionsfreie) Punkt-zu-Punkt-Interpolationsart implementiert, sodass mithilfe von Ablaufprogrammen nacheinander verschiedene Punkte angeflogen werden können, ohne das Kollisionspotenzial bei der Programmierung explizit berücksichtigen zu müssen. Verschiedene Validierungsszenarien werden zunächst in Form einer Hardware-in-the Loop-Simulation mit Dynamikmodellen der UAVs und schließlich mit realen UAVs durchgeführt.
Hrsg.: Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2022, Beiträge zum Stuttgarter Maschinenbau; 2, ISBN: 978-3-8396-1800-4





## HOCHSCHULKONTAKTE

### Das ISW pflegt durch Stipendiaten- und Studierendenaustauschprogramme Kontakte zu Universitäten in aller Welt.

**Australien:**
University of Wollongong

**Belgien:**
Katholieke Universiteit Leuven

**China:**
Hefei University of Technology
Tongji University Shanghai
Technical University of Peking

**England:**
University of Bath

**Frankreich:**
Université de Rennes 1
Supélec Paris

**Italien:**
University of Bergamo

**Kanada:**
University of British Columbia in Vancouver
University of Toronto
University of Waterloo

**Neuseeland:**
Auckland University
Massey University

**Niederlande**
TU Eindhoven

**Österreich:**
Johannes Kepler Universität Linz
Technische Universität Wien
Technische Universität Graz

**Rumänien:**
Technical University of Cluj-Napoca

**Russland:**
Staatliche Technische Universität Moskau
Staatliche Technische Universität St. Petersburg

**Schweden:**
Lund University

**Schweiz:**
ETH Zürich

**USA:**
University of California in Berkeley
University of Michigan in Ann Arbor
University of Utah in SLC

**Kooperation mit der University of Auckland:**

Professoren und Forscher beider Universitäten besprechen Kooperationsmöglichkeiten und gemeinsame Forschungsinteressen und besuchen im Austausch die jeweilige Universität. Mit interessantem kulturellem Rahmenprogramm lernen die Wissenschaftler so Land und Leute näher kennen.

Mögliche Zusammenarbeit bei:
- Promotionen
- Studienaufenthalten
- Internationalem Graduiertenkolleg: Soft Tissue Robotics

Stipendiatenprogramme mit ausländischen Hochschulen können durch die ISW-eigene Gottfried-Stute-Stiftung finanziert werden.

# SUMMER SCHOOL IN STUTTGART UND FORSCHUNGSAUFENTHALTE IN AUCKLAND (NZ) DES GRADUIERTENKOLLEGS SOFT TISSUE ROBOTICS

Soft Tissue Robotics

GEFÖRDERT VON DER DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG)

**Das Graduiertenkolleg GRK 2198/1 ist der deutsche Teil des deutsch-neuseeländischen Verbundprojektes Soft Tissue Robotics. Ziel ist es, zukünftige Experten auf dem Gebiet simulationsgestützter Methoden für die Interaktion von harten Roboterstrukturen mit weichen Materialien auszubilden.**

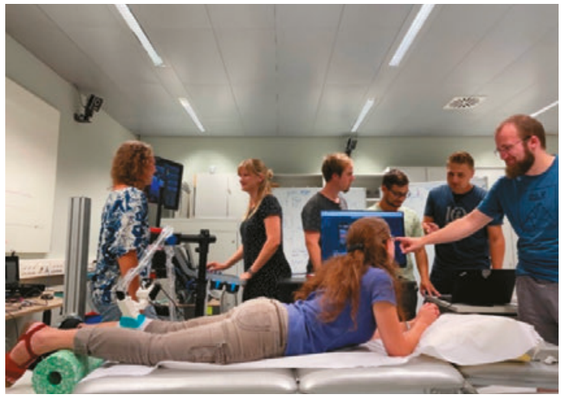


ABB.1: Aufbau zur automatisierten Ausrichtung der Ultraschallsonde aus der Summer School.

Im Rahmen des internationalen Graduiertenkolleg SoftTissue Robotics lernen Doktoranden aus Stuttgart und Auckland (Neuseeland) die Herausforderungen bei der Interaktion starrer Roboter mit weichen Materialen kennen. Ziel des Graduiertenkollegs ist die Entwicklung von neuen simulationsgestützen Regelungs- und Steuerungsarchitekturen zur roboterbasierten Handhabung von weichen Materialien. Im Rahmen der internationalen und interdisziplinären Kooperation fanden für die Doktoranden des ISWs dreimonatige Forschungsaufenthalte und eine Summer School statt.

**Summer School Soft Tissue Robotics in Stuttgart**

Im August 2022 fand eine einwöchige Summer School zur Stärkung der interdisziplinären Zusammenarbeit in Stuttgart statt. In Vorbereitung dazu tauschten sich die Doktoranden sowohl zu ihren Fachgebieten im Rahmen von Meilensteinpräsentationen, als auch bei der gemeinsamen Entwicklung des auf eine Woche begrenzten Forschungsprojekts, aus. Dabei wurden die Forschungsschwerpunkte Regelungstechnik, Steuerungstechnik, Modellbildung und Simulation, Numerische Mathematik und elektrische Antriebstechnik der sieben Stuttgarter Doktoranden in einem gemeinsamen Forschungsprojekt untergebracht.

Das Projekt wurde aus einem Teilprojekt abgeleitet, bei dem mit Scherwellenelastografie die Steifigkeit von Muskeln untersucht wird. Die Bewegung einer Ultraschallsonde sollte automatisiert werden, um die Messungen anhand der Muskelfaserrichtung zu orientieren. Mit Bildverarbeitungsalgorithmen wurde aus Ultraschallaufnahmen die Muskelfaserrichtung bestimmt und die Ultraschallsonde entsprechend mit einem Schrittmotor gedreht. In einer Pilotstudie mit zehn Probanden wurden die Ergebnisse mit manueller, mit automatisierter und ohne Ausrichtung verglichen und der Einfluss auf die Scherwellengeschwindigkeit untersucht. Weitere Informationen zum Projekt: https://www.str.uni-stuttgart.de/Events/SummerSchool2022.

**Forschungsaufenthalte an der Partneruniversität Auckland**

Im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit zwischen der University of Auckland und der Universität Stuttgart fanden zudem zwei dreimonatige Forschungsaufenthalte an der University of Auckland statt. Die Forschungsaufenthalte an der University of Auckland verbesserten den Austausch innerhalb des Graduiertenkollegs und zwischen den Universitäten. Zwei Doktoranden des ISWs hatten die Möglichkeit, persönlich mit Doktoranden der University of Auckland unter der jeweiligen Leitung von Prof. Peter Xu und Prof. Leo Cheng zusammenzuarbeiten. In den Gruppen der Co-Betreuer konnte nicht nur das eigene Projekt vorangebracht, sondern auch angrenzende Fachgebiete kennengelernt, Labore besichtigt und mit Experten aus dem medizinischen Bereich diskutiert werden. Prof. Peter Xu ist Inhaber des Lehrstuhls für Mechatronik und Maschinenbau und beschäftigt sich mit Soft Robotics. Prof. Leo Cheng erforscht am Auckland Bioengineering Institute das Magen-Darm-System. Neben dem fachlichen Austausch bot sich darüber hinaus die Gelegenheit, das Universitätsleben und das Doktorandensystem in Neuseeland kennen zu lernen.

ABB.2: Doktoranden des ISW an der Universität Auckland, Uhrenturm der Universität Auckland.

**Projektpartner:**

THE UNIVERSITY OF AUCKLAND
NEW ZEALAND

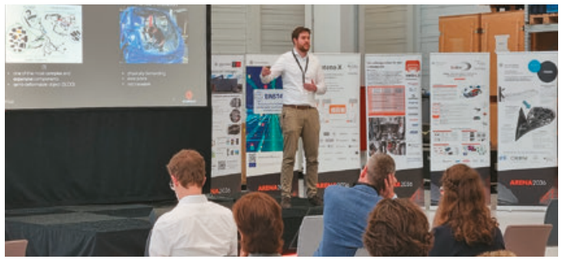
**Kontakt:**
Manuel Zürn, M.Sc.
manuel.zuern@isw.uni-stuttgart.de

Annika Kienzlen, M.Sc.
annika.kienzlen@isw.uni-stuttgart.de

## SCAP 2022- 2ND INTERNATIONAL STUTTGART CONFERENCE ON AUTOMOTIVE PRODUCTION

**Das ISW richtete gemeinsam mit ARENA2036 vom 16. bis 18. November 2022 die zweite Stuttgarte Konferenz zur Automobilproduktion aus.**

Im November 2022 fand die zweite Stuttgarter Konferenz zur Automobilproduktion unter dem Leitthema „Towards Software-Defined Manufacturing and Resilient Supply Chains“ statt. Nach dem Erfolg der ersten Konferenz SCAP2020 freuen wir uns, Ihnen mitteilen zu können, dass die zweite Ausgabe der Stuttgarter Konferenz zur Automobilproduktion 2022 in Zusammenarbeit mit ARENA2036 ein großer Erfolg war.
Die SCAP2022 fand vom 16. – 18. November 2022 auf dem Forschungscampus ARENA2036 in Stuttgart statt und bot nationalen als auch internationalen Wissenschaftlern die Möglichkeit, ihre neuesten Forschungsergebnisse vorzustellen, sich auszutauschen, neue Netzwerke zu knüpfen und den Informationsaustausch zwischen Wissenschaft und Praxis zu fördern.
Das Hauptziel der Konferenz bestand darin, fortschrittliche Technologien in den Bereichen Robotik und Automatisierung, Logistik und Fertigungsinnovationen für die zukünftige Automobilproduktion zu diskutieren.
Wir als das ISW waren nicht nur organisatorisch an der Konferenz beteiligt, sondern steuerten mit insgesamt fünf Vorträgen und einer Keynote von Prof. Alexander Verl auch inhaltlich zum Ablauf der Konferenz bei. Dabei standen vor allem aktuelle Forschungsergebnisse aus dem SDM4FZI-Verbundprojekt im Fokus.



**Kontakt:**
Shengjian Chen M.Sc.
shengjian-patrick.chen@isw.uni-stuttgart.de

Moritz Walker, M.Sc.
moritz.walker@isw.uni-stuttgart.de





## KARRIERE ALS DUALE STUDIERENDE

**Auch in der Produktionstechnik ist Informatik ein wesentlicher Innovationstreiber. Das ISW beteiligt sich daher an der Ausbildung von Informatiker*innen als Praxispartner der Dualen Hochschule Baden-Württemberg (DHBW).**

© Universität Stuttgart/ ISW, Sven Cichowicz.

Als dual Studierende bilden wir gemeinsam mit der DHBW Expert:innen im Software Engineering und der Entwicklung komplexer Anwendungen in der Produktion aus. Duale Studierende lernen am ISW im Rahmen spannender Forschungsprojekte Softwarelösungen zu konzipieren, zu realisieren und mit unseren Industriepartnern in die Praxis zu übertragen. Dazu entwickeln und bearbeiten diese während des dreijährigen dualen Studiums gemeinsam mit nationalen und internationalen Expert:innen aus Forschung und Anwendung anspruchsvolle Projekte mit höchster Entfaltungsmöglichkeit. In diesen Projekten stehen Softwaretechnische Erfahrungen, interdisziplinäres Fachwissen und Kreativität im Mittelpunkt. Ab Oktober 2023 werden die ersten beiden dualen Studierenden der Informatik das ISW dabei unterstützen, informatische Innovationen in die Produktionstechnik zu übertragen.

**Studienschwerpunkte und Ablauf:**
Während des 3-jährigen Studiums an der DHBW Stuttgart wechselt sich wissenschaftliches Lernen mit der direkten Anwendung des Erlernten in der Praxis ab. Die Theoriephasen dauern 3 Monate.
Das Informatikstudium setzt sich aus übergreifenden technischen Grundlagenfächern wie z.B. Mathematik sowie studiengangsspezifischen Lehrinhalten wie theoretische und technische Informatik und Software Engineering zusammen. Zu Beginn erhalten Sie dazu eine für Studierende konzipierte praxisorientierte Grundausbildung in der Ausbildungsabteilung und beschäftigen sich u.a. mit Programmierung, Softwareentwicklung, Prozessen und Methoden des Software Engineering und Projektmanagements.
Schwerpunkt der Praxisphasen sind Einsätze in unterschiedlichen Projekten der verschiedenen Gruppen des ISW im Großraum Stuttgart mit dem Ziel, die im Berufsalltag erforderliche Handlungs- und Sozialkompetenz zu erwerben. Das Arbeiten im Team sowie an und in Projekten steht dabei im Vordergrund. Sie erhalten die Möglichkeit kreative Ideen zu entwickeln und umzusetzen. In der Praxisphase des letzten Semesters verfassen Sie Ihre Bachelorarbeit. Themenauswahl und Kontaktaufnahme mit einer entsprechenden Fachabteilung liegen in Ihrer Verantwortung, unterstützt werden Sie von einem Ausbilder.

**Kontakt:**
Jun.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Andreas Wortmann
andreas.wortmann@isw.uni-stuttgart.de

# ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

## MITGLIEDSCHAFTEN

**Das ISW pflegt intensive Kontakte zu folgenden Forschungseinrichtungen, Verbänden und Vereinen.**

## MITARBEIT AN SELBSTVERWALTUNGSAUFGABEN DER UNIVERSITÄT

**UNIV.-PROF. DR.-ING. A. VERL**

- Mitglied des Fakultätsrats
- Studiendekan des Studiengangs „Mechatronik“
- Transfer Unit SimTech „Cluster of Excellence“
- PI SimTech, PI GSaME, PI IntCDC

**UNIV.-PROF. DR.-ING. O. RIEDEL**

- Dekan der Fakultät 7 „Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik“
- Vorstand der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering
- Mitglied im Forschungsrat der Universität Stuttgart
- Prüfungsausschussvorsitzender der Studiengänge „Mechatronik (B.Sc./M.Sc.)“ und „Automatisierungstechnik in der Produktion (Dipl.-Ing.)“
- Mitglied der Studienkommission „Mechatronik (B.Sc./M.Sc.)“

**JUN.-PROF. DR. RER. NAT. HABIL. A. WORTMANN**

- PI Artificial Intelligence Software Academy (AISA)
- Mitglied verschiedener Berufungskommissionen
- IntCDC Associated Researcher
- IMPRS-IS Associated Scientist

**DIPL.-ING. M. SEYFARTH**

- Mitglied der Studienkommissionen „Mechatronik (B.Sc./M.Sc.)“
- Studiengangbeauftragter, Studiengang „Mechatronik“
- Stundenplanbeauftragter, Studiengang „Mechatronik“
- Mitglied des Zulassungsausschusses, Studiengang „M.Sc. Mechatronik“
- Mitglied der Auswahlkommission „Studiengang B.Sc. Mechatronik“
- Bafög-Beauftragter, Studiengang „Mechatronik“





## EHRENAMTLICHE MITARBEIT IN INSTITUTIONEN, AUSSCHÜSSEN UND VERBÄNDEN

**UNIV.-PROF. DR.-ING. A. VERL**

- CIRP (The International Academy for Production Engineering) – Associate Member
- DFG Fachkollegium 401 Produktionstechnik – Mitglied
- GfT (Gesellschaft für Fertigungstechnik, Stuttgart) – Chairman
- GSaME (Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering) – Mitglied
- IFR (International Federation of Robotics) – Chairman of the Research Committee
- IntCDC Cluster of Excellence (Integrative Computational Design and Construction for Architecture) – Principal Investigator
- ISR (International Symposium on Robotics) – Conference Chair
- SERCOS International – Vorstandsmitglied
- SimTech (Industriekonsortium im Exzellenzcluster „Simulation Technology“) – Vorstandsvorsitzender
- SimTech Cluster of Excellence (Stuttgart Research Centre for Simulation Technology) – Principal Investigator
- MHI e.V. (Wissenschaftliche Gesellschaft für Montage, Handhabung und Industrierobotik)– Vorstandmitglied (seit Mai 2018)
- WGP (Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik) – Mitglied

**UNIV.-PROF. DR.-ING. O. RIEDEL**

- Arbeitsgemeinschaft Simulation – Mitglied
- Dr.-Artur-Fischer Stiftung – Beirat und Jurymitglied
- EXAPT e.V. – Beirat
- Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e. V. – Vorstand
- FpF (Verein zur Förderung produktionstechnischer Forschung e.V.; Stuttgart) – Vorstand
- GSaME (Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering) – Mitglied
- IFPR (International Foundation for Production Research) – Boardmember
- Informatik Verbund Stuttgart – Vorstand
- nachhaltig .digital (Kompetenzplattform für Nachhaltigkeit und Digitalisierung im Mittelstand) – Beirat
- NPM (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität) – Beratendes Mitglied
- prostep iViP e.V. – Ehrenmitglied
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) – Vorsitzender des Landesverbandes Baden-Württemberg
- Virtual Dimension Center – Vorstand
- Württembergischer Ingenieurverein e.V. – Vorstandsmitglied

**JUN.-PROF. DR. RER. NAT. HABIL. A. WORTMANN**

- Querschnittsfachausschuss Modellierung der Gesellschaft für Informatik
- European Association for Programming Languages and Systems
- Software and Systems Modeling - Mitglied der Redaktionsleitung
- Journal of Object Technology - Mitglied der Redaktionsleitung
- Journal of Software Engineering for Autonomous Systems - Mitglied der Redaktionsleitung
- International Workshop on Modeling Language Engineering – Steering Committee
- International Workshop on Robotics Software Engineering – Steering Committee

**DR.-ING. A. LECHLER**

- DFAM (Deutsche Forschungsgesellschaft für Automatisierung und Mikroelektronik e.V.) – Mitglied
- Kernteam ARENA 2036 – Mitglied
- OPC Foundation – Mitglied
- PNO (PROFIBUS Nutzerorganisation e.V.) – Mitglied
- Sercos International e.V. – Mitglied
- EtherCAT Technology Group – Mitglied
- Industrial Internet Consortium - Mitglied
- Verein der Freunde und ehemaligen Mitarbeiter des Instituts für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart e.V. – Geschäftsführer
- VDW Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. – Mitglied

**DR.-ING. K.-H. WURST**

- Mitarbeit im Interuniversitären Zentrum IZST

**DIPL.-ING. F. FRICK**

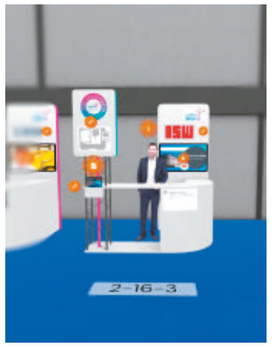
- IIC TSN Testbed Stuttgart – Koordinator

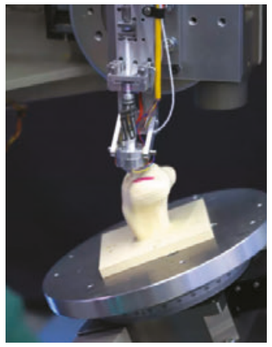
**T. HEINEMANN, M.SC.**

- VDMA OPC UA for Machinery – Harmonization Working Group

# AKTIVE TEILNAHME AN MESSEN UND AUSSTELLUNGEN

## DAS ISW AUF DER METAV DIGITAL



Unter dem Motto NETWORKING einfach dreifach fand vom 23.03.-26.03.2021 zum ersten Mal die **METAV digital** statt. Auch das ISW war Teil dieser Veranstaltung. Dabei stand die Präsentation von umati im Zentrum. Hierzu haben wir mit mehreren Demo-Maschinen im Dashboard https://umati.app/overview/metav beigetragen.

**Metav 2022** zeigte Medtech-Lösungen von Quereinsteigern. Eine neuartige Technologie stellt beispielsweise das Bioprinting dar. Es verfolgt das Ziel, biologische Gewebestrukturen als Ersatz für erkranktes Patientengewebe herzustellen.
Am ISW wird an einer 3D-Druck-Anwendung geforscht, mit der Kniearthrose mittels personalisierter Knorpelimplantate geheilt werden soll.

## AUTOMATICA MESSE, MÜNCHEN 2022

Auf der automatica 2022 vom 21. bis 24. Juni 2022 in München präsentierten wir einen Demonstrator zur Handhabung von biegeschlaffen Leitungssätzen. Mittels einer Dynamiksimulation des Leitungssatzes und 3D-Echtzeit-Daten einer Stereokamera sind die Greifposen und Roboterbewegungen unter Berücksichtigung der Deformation des Leitungssatzes dynamisch geplant.

## MESSEAUFTRITTE ISW & UMATI

Der VDW entwickelt umati (universal machine tool interface): eine universelle Schnittstelle, die Werkzeugmaschinen und Anlagen sicher, naht- und mühelos in kunden- und anwenderspezifische IT-Ökosysteme integrieren kann. Das ISW zählt zu den Kernpartnern der Initiative und übernimmt seit Herbst 2017 die wissenschaftliche und technische Begleitung sowie die Projektleitung von umati.
Begleitend zum Projekt waren Mitarbeiter des ISW auf folgenden Messen für umati unterwegs:

- AMB Stuttgart, 2022
- IMTS - International Manufacturing Technology Show in Chicago, 2022
- JIMTOF in Tokyo, 2022

Neben der AMB in Stuttgart unterstützte das ISW ebenfalls den umati-Stand auf der IMTS - International Manufacturing Technology Show in Chicago. Gemeinsam mit einem Kollegen vom IFW - Institute of Production Engineering and Machine Tools Hannover und Vertretern von VDW (Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken) und VDMA präsentierten wir dem Fachpublikum in den USA die Idee der universellen Maschinensprache basierend auf OPC UA. Auch auf der JIMTOF waren Mitarbeiter des ISW vertreten. In Japan wurden neben den technischen Inhalten vor Allem der internationale Charakter der umati-Initiative thematisiert.

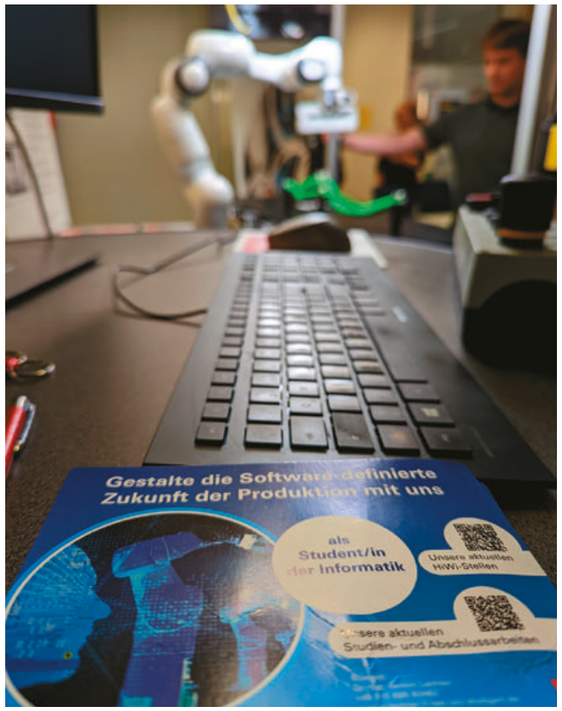
Das ISW unterstützte den umati-Stand auf der IMTS - International Manufacturing Technology Show in Chicago.

Das ISW unterstützt den umati-Stand auf der AMB in Stuttgart.

Das ISW unterstützt das umati Team auf der JIMTOF in Tokyo. Teil vom Showcase (https://umati.app) ist dieser smarte Messschieber. Er ist mit OPC UA for Geometrical Measurement Systems abgebildet, ein Standard, bei dessen Erstellung das ISW unterstützt.

## INFORMATIK-KONTAKTMESSE, 2022

Zur 50. Informatik-Kontaktmesse am 9. November 2022 stellten wir einen Roboter zur kamerabasierten Handhabung von biegeschlaffen Leitungssätzen vor. Manuel Zürn und Hannes Grabmann waren dabei vor Ort und freuten sich über interessante Gespräche zur IT&OT in der Steuerungstechnik.



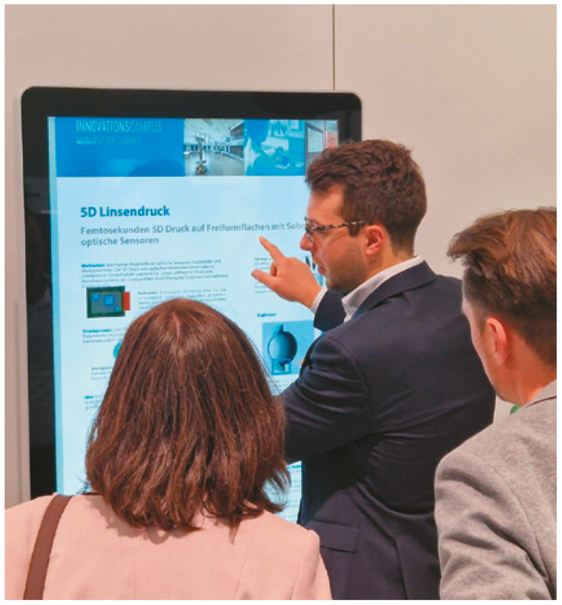
## SPS – SMART PRODUCTION SOLUTIONS 2022, NÜRNBERG

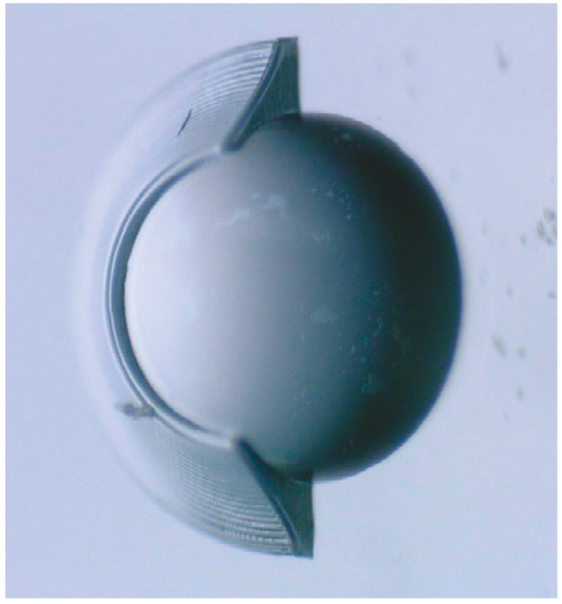
Im Jahr 2022 drehte sich auf dem Stand des ISW alles um die Stuttgarter Maschinenfabrik, als Realisierung von Software-defined Manufacturing (SDM). Neben den Anwendungen (Virtueller CNC-Kern, sprach- und webbasierte Produktkonfiguration, cloudbasierte Datenvisualisierung, Optimierung mithilfe von Digitalen Zwillingen, Echtzeitdeployment und vielen mehr) die sich auf der obersten Schicht der SDM-Referenzarchitektur einordnen, wurde die Verwaltungsschale als Bindeglied zwischen den Anwendungen und der Infrastruktur vorgestellt. Von besonderer Wichtigkeit um darüberliegende Schichten zum Leben zu erwecken ist eine neuartige technologische Infrastruktur, die auf Basis von Edge-Nodes, also echtzeitfähigen performanten Recheneinheiten und TSN realisiert wurde.
„Steuerungstechnik aus der Cloud“ wurde auf dem Messestand des ISW somit Realität. Auf einer Edge-Node liefen containerisierte CNC-Kerne, die sich bei Bedarf einfach Updaten oder Austauschen lassen. Im Fall des Messeaufbaus wurden zwei Fräsmaschinen mit Hilfe eines Edge-Nodes gesteuert. Die Kommunikation zwischen Edge-Node und Maschinen wurde über TSN umgesetzt.
Als weiteres Highlight wurde als Teil der Stuttgarter Maschinenfabrik ein Laserbearbeitungszentrum vorgestellt, das sich durch eine innovative FPGA-basierte CNC-Steuerung und redundante Achsen auszeichnet. Wie die beiden Fräsmaschinen wurde auch die Lasermaschine vollständig in der Verwaltungsschale abstrahiert und somit für die Anwendungen zugänglich.

## TAG DER WISSENSCHAFT, CAMPUS VAIHINGEN 2022

## FORMNEXT, FRANKFURT AM MAIN 2022

Auf der Formnext - Where ideas take shape stellten wir ein 5D-Linsendruck-Verfahren zur schnellen und individualisierbaren Fertigung optischer Linsen im Mikro- bis Millimeterbereich vor.
Mit bedruckten Glashalbkugeln gewährt das ISW & PI4 neue Einblicke in Möglichkeiten zur Fertigung von optischen Linsen im µm-Bereich. Ziel des Projekts, 5D Linsendruck, ist es zu zeigen, dass günstige Glashalbkugeln für den Einsatz in innovativen Sensoren, mit dem 2-Photon-Polymerisations Druckprozess erfolgreich 5-achsig bedruckt werden können. Hier, die ersten vielversprechenden Druckergebnisse.



# MASCHINENAUSSTATTUNG

## Das ISW verfügt über einen vielseitig einsetzbaren Maschinenpark

**WERKZEUGMASCHINEN:**

- **DMG DMC 650V,** 3-Achs CNC-Fräsmaschine
- **DMG DMU 50 ecoMill**, 5-Achs CNC-Fräsmaschine
- **Exeron Digma HSC600**, 5-Achs HSC-CNC-Fräsmaschine

**ROBOTER:**

- **Kuka KR210**
- **KUKA KR500**-Roboter-Bearbeitungszelle
- **Stäubli TX40**, 2 Stück
- **Franka Emika Panda**, 2 Stück
- **COPacabana**, Räumlicher Seilroboter
- **CaroPrinter**, Seilroboter für die Additive Fertigung
- **ABB IRB4400**

**WERKSTATTMASCHINEN:**

- Bandsäge Klaeger VBS 405 S
- Tischbohrmaschinen
- Ständerbohrmaschine
- Schleifböcke
- Deckel FP3A, Universalfräsmaschine
- Maho MH800E, CNC-Fräsmaschine
- Drehmaschine Weiler Praktikant140,
  Spitzenhöhe 140 mm Spitzenweite 650 mm
- Drehmaschine VDF, Spitzenhöhe 230 mm Spitzenweite 1000 mm
- Horizontalflachschleifmaschine Blohm,
  Schleiflänge 700 mm, Schleifbreite 350 mm, Schleifhöhe 425 mm

**SONSTIGE AUSSTATTUNG:**

- Versuchsstand Einzel-Kugelgewindetrieb
- Versuchsstand Doppel-Kugelgewindetrieb „Doppel-KGT“
- Versuchsstand Zahnstange-Ritzelantrieb „V3000“
- Getriebe-Versuchsstand
- Versuchsstand Impulsaktor
- Seilroboter Seilprüfstand „CATi“
- Versuchsstand Lasermaschine mit redundanten Achsen „LarA“
- Stabkinematik 3D-Drucker Testplattform „Linapod“
- Sandschalungsdrucker „Sandy“
- 7-Achs-Druckanlage
- 8-Achs-Druckanlage
- Demonstrator für Gießregelung „Gießela“
- Demonstrator für TSN „TSN-Testbed“
- Fahrerloses Transportsystem mit UR10 Roboter „FTS“
- OSACA1, „3-Achs CNC-Fräsmaschine“
- OSACA2, „3-Achs CNC-Fräsmaschine“
- FiveX „5-Achs CNC-Fräsmaschine
- Schlagzeugroboter
- Virtuellen Tischkicker
- Cloud Manufacturing Roboterzelle
- Steuerungslabor
- Antriebslabor

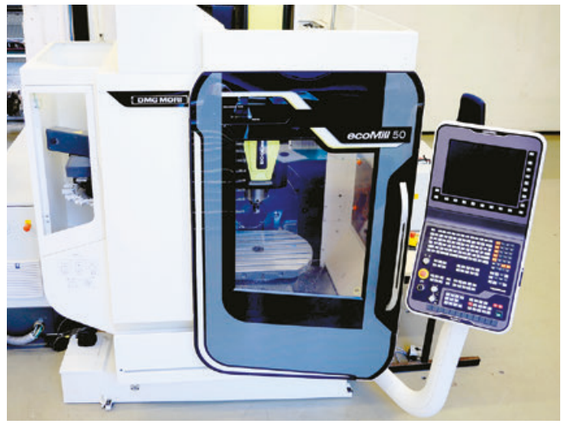
COPacabana, Räumlicher Seilroboter

Stäubli TX40

KUKA KR500-
Roboter-Bearbeitungszelle

Kuka KR210

Franka Emika Panda



DMG DMU 50 ecoMill

Exeron Digma HSC600

Versuchsstand Zahnstange-Ritzelantrieb

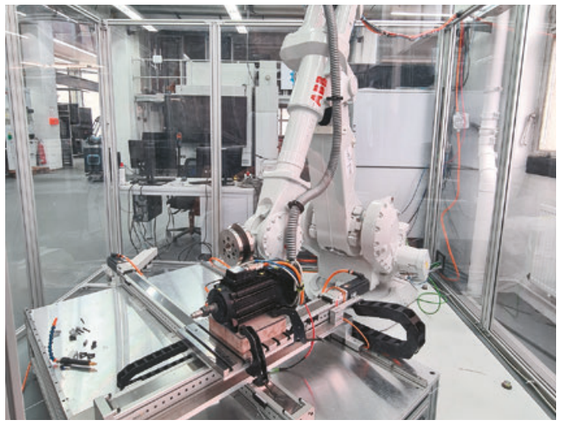
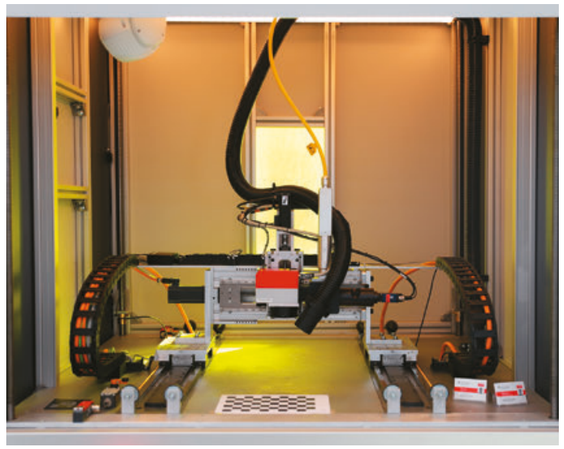


ABB IRB4400 Roboter



ISW Lasermaschine

OSACA2, „3-Achs CNC-Fräsmaschine“

# VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE

## 2022


**Bubeck, W.; Frick, F.; & Verl, A.:** Hardware-Accelerated Data Processing of Capacitive Sensor Arrays for Industrial and Service Robotic Applications. ISR Europe, 54, 174–179. https://ieeexplore.ieee.org/document/9861814

**Dalibor, M.; Heithoff, M.; Michael, J.; Netz, L.; Pfeiffer, J.; Rumpe, B.; Varga, S.; & Wortmann, A.:** Generating customized low-code development platforms for digital twins. Journal of Computer Languages, 70, 101117. https://doi.org/10.1016/j.cola.2022.101117

**Dietrich, D.; Neubauer, M.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Fehlerfreie Produktion durch flexibilisierte Prozesse/Error-free production through flexible manufacturing processes – Change of planning and error compensation in software-defined manufacturing. wt Werkstattstechnik online, 112(05), Article 05. https://doi.org/10.37544/1436-4980-2022-05-6

**Ellwein, C.; Hekeler, M.; & Riedel, O.:** Ambiguity Tolerant Commissioning Ontology: From an upper ontology to a domain specific implementation. Procedia CIRP, 112, 91–96. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.042

**Ellwein, C.; & Neubauer, M.:** Neue technologische Grundlage. Referenzarchitekturmodell zur Digitalisierung von Produktionsnetzwerken. SPS MAGAZIN, 01/22, Article 01/22.

**Elser, A.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Implementation of Surface Interpolators for Compound Surfaces without C2-continuity. Procedia CIRP, 109, 19–24. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.208

**Elser, A.; Teicht, S.; & Lechler, A.:** Modellbasierte numerische Steuerung: Entwicklung und Implementierung einer Steuerungsarchitektur für das Schwerkraftgießen. In WT WERKSTATTSTECHNIK (Nr. 5; Bd. 110, Nummer 5, S. 6). VDI Verlag. https://doi.org/10.37544/1436-4980-2020-05

**Esslinger, E.; & Neubauer, M.:** Referenzarchitektur für Maschinen und Fertigungsprozesse - Durchgängiges Engineering. SPS-Magazin, 06/22, Article 06/22

**Feichtinger, K.; Meixner, K.; Rinker, F.; Koren, I.; Eichelberger, H.; Heinemann, T.; Holtmann, J.; Konersmann, M.; Michael, J.; Neumann, E.-M.; Pfeiffer, J.; Rabiser, R.; Riebisch, M.; & Schmid, K.:** Industry Voices on Software Engineering Challenges in Cyber-Physical Production Systems Engineering. 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 1–8. https://doi.org/10.1109/ETFA52439.2022.9921568

**Fischer, M.; Riedel, O.; & Lechler, A.:** Comprehensive Analysis of Software-Based Fault Tolerance with Arithmetic Coding for Performant Encoding of Integer Calculations. In M. Trapp, F. Saglietti, M. Spisländer, & F. Bitsch (Hrsg.), Computer Safety, Reliability, and Security (S. 144–157). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14835-4_10

**Frick, F.; & Neubauer, M.:** Grundlagen für eine softwaredefinierte Fertigung - Paradigmenwechsel in der Produktion. SPS-Magazin, 2022(2), Article 2

**Fur, S.; Delonge, N.; Riedel, O.; & Verl, A.:** Hybrid Commissioning of Industrial Plants: A Merge-Tool for PROFINET. 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 1–7. https://doi.org/10.1109/ETFA52439.2022.9921686

**Fur, S.; Mages, A.; Wortmann, A.; & Riedel, O.:** Auf dem Weg zum digitalen Zwilling/Investigation and compensation of the discrepancy between simulation models and their twins – On the way to the digital twin. wt Werkstattstechnik online, 112(04), Article 04. https://doi.org/10.37544/1436-4980-2022-04-58

**Hacks, S.; Katsikeas, S.; Rencelj Ling, E.; Xiong, W.; Pfeiffer, J.; & Wortmann, A.:** Towards a Systematic Method for Developing Meta Attack Language Instances. In A. Augusto, A. Gill, D. Bork, S. Nurcan, I. Reinhartz-Berger, & R. Schmidt (Hrsg.), Enterprise, Business-Process and Information Systems Modeling (S. 139–154). Springer International Publishing

**Heinemann, T.; Friedl, S.; & Lechler, A.:** OPC-UA-Domänenmodelle heute und morgen. In WT Werkstattstechnik online (Ausgabe 5-2022; Nummer Ausgabe 5-2022, S. 320–325). VDI Fachmedien GmbH & Co. KG

**Heinemann, T.; Gihr, M.; Riedel, O.; & Lechler, A.:** Towards Data-driven Production: Analysis of Data Models Describing Machinery Jobs in OPC UA. Proceedings of the 19th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. https://doi.org/10.5220/0011142900003271

**Hönig, J.; Schnierle, M.; Wehnert, C.; Littfinski, D.; Scheifele, C.; Pfeifer, D.; Münster, C.; Roth, A.; Franz, J.; Röck, S.; & Ferl, A.:** Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation zur Schulung technischer Fachkräfte im Maschinen- und Anlagenbau. In W. und K. L. Hochschule für Technik (Hrsg.), Wissenstransfer im Spannungsfeld von Autonomisierung und Fachkräftemangel. Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig. https://doi.org/10.33968/2022.24

**Jaensch, F.; Klingel, L.; & Verl, A.:** Virtual Commissioning Simulation as OpenAI Gym - A Reinforcement Learning Environment for Control Systems. 2022 5th International Conference on Artificial Intelligence for Industries (AI4I), 64–67. https://doi.org/10.1109/AI4I54798.2022.00023

**Jaensch, F.; Kübler, K.; Schwarz, E.; & Verl, A.:** Test-Driven Reward Function for Reinforcement Learning: A Contribution towards Applicable Machine Learning Algorithms for Production Systems. Procedia CIRP, 112, 103–108. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.043

**Jud, O.; Helfesrieder, N.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Vorspannungsnachstellung an Kugelgewindetrieben/Preload adjustment on ball screws – Methods for increasing service life due to automatic adjustment of preload force. wt Werkstattstechnik online, 112(05), Article 05. https://doi.org/10.37544/1436-4980-2022-05-12

**Jud, O.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Vorspannung adaptiv nachstellen. konstruktionspraxis, 08, Article 08. https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/epaperarchiv/konstruktionspraxis_2022008/html5/index.html?pn=33

**Kaiser, B.; Reichle, A.; & Verl, A.:** Model-based automatic generation of digital twin models for the simulation of reconfigurable manufacturing systems for timber construction. Procedia CIRP, 107, 387–392. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.063

**Kaiser, B.; Wolf, M.; & Verl, A.:** Modular Control Architecture for Reconfigurable Fabrication Systems for Prefabrication in Construction. ISR Europe 2022; 54th International Symposium on Robotics, 1–7

**Kampert, D.; Fisel, J.; Ungen, M.; Koo, C. H.; Leberle, U.; & Neubauer, M.:** SDM in der Anwendung - Simulationsgestützte Optimierung wandlungsfähiger Produktionssysteme. SPS-Magazin, 05/22, Article 05/22

**Kienzlen, A.; Jaensch, F.; Verl, A.; & Cheng, L.:** Concept for a Reinforcement Learning Approach to Navigate Catheters Through Blood Vessels. 2022 28th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). https://doi.org/10.1109/M2VIP55626.2022.10041096

**Klingel, L.; Kamm, V.; & Verl, A.:** Comparison and Application of Multi-Rate Methods for Real-Time Simulations of Production Systems. Proceedings of the 63rd International Conference of Scandinavian Simulation Society. https://doi.org/10.3384/ecp192008

**Klingel, L.; Penter, L.; Mayer, P.; Ihlenfeldt, S.; & Verl, A.:** Digital Twins in deep drawing for virtual tool commissioning and inline parameter optimization. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1238/1/012072

**Kovaleva, D.; Nistler, M.; Blandini, L.; Sobek, W.; & Verl, A.:** Rezyklierbare Sandschalungen – Auf dem Weg zur Kreislaufproduktion leichter Betonbauteile. Beton- und Stahlbetonbau, 117(5), Article 5. https://doi.org/10.1002/best.202200009

**Kovaleva, D.; Nistler, M.; Verl, A.; Blandini, L.; & Sobek, W.:** Zero-Waste Production of Lightweight Concrete Structures with Water-Soluble Sand Formwork. In R. Buswell, A. Blanco, S. Cavalaro, & P. Kinnell (Hrsg.), Proceedings of the 3rd RILEM International Conference on Digital Fabrication with Concrete (Digital Concrete 2022) (S. 3–8). Springer International Publishing.

**Littfinski, D.; & Verl, A.:** Virtual Reality in der Steuerungstechnik. wt Werkstattstechnik online, 112(09), Article 09. https://doi.org/doi.org/10.37544/1436-4980-2022-09

**Lässig, N.; Herschel, M.; Reichle, A.; Ellwein, C.; & Verl, A.:** The ArchIBALD Data Integration Platform: Bridging Fragmented Processes in the Building Industry. In J. De Weerdt & A. Polyvyanyy (Hrsg.), Intelligent Information Systems (S. 45–54). Springer International Publishing

**May, M.; Fisel, J.; & Neubauer, M.:** Forschungsprojekt zu SDM-basierter Produktion – Die Beherrschung der Wandlungsfähigkeit. SPS-Magazin, 04/22, Article 04/22

**Mesmer, P.; Hinze, C.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Gain-Scheduled Drive-based Damping Control for Industrial Robots. 2022 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 1706–1713. https://doi.org/10.1109/AIM52237.2022.9863417

**Mesmer, P.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Genauigkeit von Robotern steigern. INDUSTRIAL Production, 11/2022, 46–47

**Mesmer, P.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Sensorlose Hysteresekompensation von Industrierobotern. antriebstechnik, 08/2022, 40–42.

**Mesmer, P.; Nagel, P.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Modeling and Identification of Hysteresis in Robot Joints with Cycloidal Drives. 2022 IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (AMC), 358–363. https://doi.org/10.1109/AMC51637.2022.9729274

**Mesmer, P.; Neubauer, M.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Robust design of independent joint control of industrial robots with secondary encoders. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 73, 102232. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102232

**Mesmer, P.; Riedel, P.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Investigation and Compensation of Hysteresis in Robot Joints with Cycloidal Drives. In T. Schüppstuhl, K. Tracht, & J. Fleischer (Hrsg.), Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics (S. angenommen, noch nicht veröffentlicht). Springer Berlin Heidelberg

**Michael, J.; Pfeiffer, J.; Rumpe, B.; & Wortmann, A.:** Integration Challenges for Digital Twin Systems-of-Systems. 2022 IEEE/ACM 10th International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems and Software Ecosystems (SESoS), 9–12

**Neher, P.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Experimental Evaluation of the Deterministic Wireless Communication System Industrial LTE. 2022 8th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE), 157–162. https://doi.org/10.1109/ICMRE54455.2022.9734108

**Neher, P.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Identification and Classification of the Communication Data of Automated Guided Vehicles and Autonomous Mobile Robots. 2022 8th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA), 68–75. https://doi.org/10.1109/ICARA55094.2022.9738572

**Neubauer, M.; Ellwein, C.; & Frick, F.:** Kontinuität das neue Paradigma. Computer&Automation, 4/2022, 28–31. https://www.computer-automation.de/unternehmensebene/produktionssoftware/kontinuitaet-das-neue-paradigma.195461.html

**Neubauer, M.; Frick, F.; Ellwein, C.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Software-defined Manufacturing - Ein Paradigmenwechsel für die industrielle Produktion. wt Werkstatttechnik online, 112(6), Article 6. https://doi.org/10.37544/1436–4980–2022–6–33

**Neubauer, M.; Klingel, L.; & Reiff, C.:** Forschungsinstitut baut Fabrik der Zukunft - Maschinenfabrik Made in Stuttgart. SPS-Magazin, 10/22, Article 10/22

**Neumann, R.; & Neubauer, M.:** Forschungsinstitut baut Fabrik der Zukunft - Abbildung mit Verwaltungsschalen. SPS-Magazin, 11/2022, Article 11/2022

**Nistler, M.; Kovaleva, D.; Tepper, L.; Blandini, L.; Sobek, W.; & Verl, A.:** Camera-based Process Monitoring for Powder Bed Additive Manufacturing in Construction. Procedia CIRP, 107, 534–539. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.021

**Pfeifer, D.; Scheifele, C.; & Neubauer, M.:** Use-Case für virtualisierte Steuerungstechnik – Einfacher zum Digital Twin. SPS-Magazin, 07/22, Article 07/22

**Pfeiffer, J.; Lehner, D.; Wortmann, A.; & Wimmer, M.:** Modeling Capabilities of Digital Twin Platforms - Old Wine in New Bottles? The Journal of Object Technology, 21(3), Article 3. https://doi.org/10.5381/jot.2022.21.3.a10

**Reichenbach, T.; Trautwein, F.; Pott, A.; & Verl, A.:** Parallele Seilroboter: Endlose Rotation durch Hybridstruktur. Fachtagung VDI MECHATRONIK 2022. https://doi.org/10.26083/TUPRINTS-00020963

**Reichle, A.; Ellwein, C.; & Verl, A.:** Adaptive CAM planning to support co-design in the building industry. In N. Anwer (Hrsg.), Procedia CIRP (Bd. 109, S. 78–83). https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.217

**Reiff, C.; & Neubauer, M.:** Forschungsinstitut baut Fabrik der Zukunft - Durchgängige Daten-Pipelines. SPS-Magazin, 13/23, Article 13/23.

**Schmucker, B.; Trautwein, F.; Hartl, R.; Lechler, A.; Zaeh, M. F.; & Verl, A.:** Online Parameterization of a Milling Force Model using an Intelligent System Architecture and Bayesian Optimization. Procedia CIRP, 107, 1041–1046. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.105

**Schulte, A.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Impact Actuator for Increased Dynamics. IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1–6. https://doi.org/10.1109/IECON49645.2022.9968593

**Schütz, A.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Modelling for Control of Vacuum Grippers in automatically reconfigurable Fixturing Systems for thin-walled Workpieces. Procedia CIRP, 115, 226–231. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.078

**Strljic, D.; Kienzlen, A.; & Riedel, O.:** Formale Sprachen für Fabriksimulation/Comparative Analysis of Description Models and Languages for Factory Simulation - Formal Languages for Factory Simulation. wt Werkstattstechnik online, 112(04), Article 04. https://doi.org/10.37544/1436-4980-2022-04-21

**Tinsel, E.-F.; & Riedel, O.:** A Virtual Assistant System for the Requirements Elicitation and Initial Simulation Model Variant Generation of Modular Industrial Plants. 2022 28th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP), 1–4. https://doi.org/10.1109/M2VIP55626.2022.10041099

**Tinsel, E.-F.; & Verl, Prof. Dr.-I. A.:** A simulation model extension to enable continuous control tests during the Virtual Commissioning. Procedia CIRP, 112, 97–102. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.046

**Verl, A.; & Steinle, L.:** Adaptive compensation of the transmission errors in rack-and-pinion drives. CIRP Annals, 71(1), Article 1. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2022.03.026

**von Bergen, T.; Hert, C.; Röck, S.; Klingel, L.; Jaensch, F.; & Verl, A.:** Simulationsgestützter Betrieb von Indoor-Flugrobotern. wt Werkstattstechnik online, 112(05), Article 05. https://doi.org/doi.org/10.37544/1436-4980-2022-05





**Wulle, F.; Gorke, O.; Schmidt, S.; Nistler, M.; Tovar, G. E. M.; Riedel, O.; Verl, A.; Weber, A.; & Southan, A.:** Multi-axis 3D printing of gelatin methacryloyl hydrogels on a non-planar surface obtained from magnetic resonance imaging. Additive Manufacturing, 50, 102566. https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102566

**Zahn, P.; & Neubauer, M.:** Use-Case: Datenbasierte Dienste mit einheitlichen Werkzeugen – Mehrwert der Datenfusion. SPS-Magazin, 08/22, Article 08/22

**Zürn, M.; Wnuk, M.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Software Architecture For Deformable Linear Object Manipulation: A Shape Manipulation Case Study. 2022 IEEE/ACM 4th International Workshop on Robotics Software Engineering (RoSE), 9–16. https://doi.org/10.1145/3526071.3527520

**Zürn, M.; Wnuk, M.; Schneider, A.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Localization and Tracking of Deformable Linear Objects with Self Organizing Maps. Proceedings of the 54th International Symposium on Robotics (ISR), 17–25.

## 2021

**Brenner, F.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Acceleration-based disturbance compensation for elastic rack-and-pinion drives. Production Engineering - Research and Development. https://doi.org/10.1007/s11740-021-01068-w

**Brenner, F.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Störgrößenkompensation für Vorschubantriebe. wt Werkstattstechnik online, 111(1), Article 1

**Ellwein, C.; Krimstein, V.; & Riedel, O.:** Ambiguity Tolerant Commissioning Ontology: Targeting Client Communication. 2021 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), 1–9. https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC52061.2021.9570239

**Ellwein, C.; Reichle, A.; Herschel, M.; & Verl, A.:** Integrative data processing for cyber-physical off-site and on-site construction promoting co-design. Procedia CIRP, 100, 451–456. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.103

**Ellwein, C.; Xu, A.; Schniering, B.; Nötzel, V.; & Wüseke, F.:** Digitale Prozesslenkung mit ToolProduction. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 116(11), Article 11. https://doi.org/10.1515/zwf-2021-0175

**Elser, A.:** Formgießen: Modellbasierte Numerische Steuerung. In GIESSEREI PRAXIS (Bd. 108, S. 80–81). https://www.giesserei-praxis.de/news-artikel/artikel/gesamtausgabe-giesserei-praxis-09-10-2021

**Elser, A.; & Lechler, A.:** Implementation of a Model Based Numerical Control for the Gravity Die Casting Process. 2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 1, 1094–1099. https://doi.org/10.1109/ICIT46573.2021.9453492

**Fischer, M.; & Alber, S.:** Hightech im Brownfield - Retrofit mit Funktechnologien. https://service-and-maintenance.com/rft/hightech-im-brownfield/

**Fischer, M.; Riedel, O.; & Lechler, A.:** Arithmetic Coding for Floating-Points and Elementary Mathematical Functions. In IEEE (Hrsg.), 2021 5th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS) (S. 270–275). https://doi.org/10.1109/ICSRS53853.2021.9660663

**Fischer, M.; Riedel, O.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Arithmetic Coding for Floating-Point Numbers. 2021 IEEE Conference on Dependable and Secure Computing (DSC), 01–08. https://doi.org/10.1109/DSC49826.2021.9346236

**Friedl, S.; Heinemann, T.; Lechler, A.; & Riedel, O.:** Implicit Templates for Conformance Units in OPC UA Companion Specifications. 2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 1, 730–735. https://doi.org/10.1109/ICIT46573.2021.9453582

**Fur, S.; Riedel, O.; & Verl, A.:** Hybrid Commissioning of Production Plants. 2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA ), 1–6. https://doi.org/10.1109/ETFA45728.2021.9613256

**Heiland, S.; Klingel, L.; Penter, L.; Jaensch, F.; Schenke, C.; Ihlenfeldt, S.; & Verl, A.:** Virtual Tool Commissioning using LS-DYNA Functional Mock-up Interface. https://www.dynalook.com/conferences/13th-european-ls-dyna-conference-2021/simulation-methods/heiland_tu_dresden.pdf

**Heinemann, T.; Friedl, S.; & Lechler, A.:** Interoperabilität für OPC UA Spezifikationen. In WT Werkstattstechnik online (Ausgabe 5-2021; Nummer Ausgabe 5-2021, S. 324–329). VDI Fachmedien GmbH & Co. KG. https://www.ingenieur.de/fachmedien/wt-werkstattstechnik/ausgaben-wt-werkstattstechnik-online/inhalte-der-online-ausgabe-5-2021/

**Helfesrieder, N.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Strukturoptimierte Maschinenkomponenten mit hoher Dämpfung. Antriebstechnik, 3/2021(3), Article 3. http://digital.antriebstechnik.de/antriebstechnik-3-2020/65318893/40

**Helfesrieder, N.; Neubauer, M.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Hybrid manufacturing of topology optimized machine tool parts through a layer laminated manufacturing method: Practical validation using the example of a bearing block. Production Engineering Research and Development. https://doi.org/10.1007/s11740-021-01095-7

**Henzel, R.; Ellwein, C.; Herzwurm, G.; & Riedel, O.:** Cloud manufacturing: Theoretical localization within production theory. Procedia CIRP, 99, 555–560. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.076

**Jaensch, F.; Steidle, A.; & Verl, A.:** Curriculum Multi-Stage Reinforcement Learning for Automated Interlinked Production Systems on Virtual Commissioning Simulations. 2021 Third International Conference on Transdisciplinary AI (TransAI), 129–136. https://doi.org/10.1109/TransAI51903.2021.00031

**Kaiser, B.:** Replication data for: Planning of Curvature-Optimal Smooth Paths for Industrial Robots Using Neural Networks. https://doi.org/10.18419/darus-2126

**Kaiser, B.; Littfinski, D.; & Verl, A.:** Automatic Generation of Digital Twin Models for Simulation of Reconfigurable Robotic Fabrication Systems for Timber Prefabrication. In Proceedings of the 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC) (S. 717–724). International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC). https://doi.org/10.22260/ISARC2021/0097

**Kaiser, B.; Strobel, T.; & Verl, A.:** Human-Robot Collaborative Workflows for Reconfigurable Fabrication Systems in Timber Prefabrication using Augmented Reality.
M2VIP, 576–581. http://dblp.uni-trier.de/db/conf/m2vip/m2vip2021.html#KaiserSV21

**Kaiser, B.; & Verl, A.:** Planning of Curvature-Optimal Smooth Paths for Industrial Robots Using Neural Networks. 2021 4th International Conference on Artificial Intelligence for Industries (AI4I), 10–15. https://doi.org/10.1109/AI4I51902.2021.00011

**Kienzlen, A.; & Verl, A.:** Konzept zur Integration eines kontinuierlichen Materialflussmodells in die Virtuelle Inbetriebnahme durch Signalgenerierung. In J. Franke & P. Schuderer (Hrsg.), Simulation in Produktion und Logistik 2021 (S. 585–594). Cuvillier Verlag

**Lehner, D.; Pfeiffer, J.; Tinsel, E.-F.; Strljic, M. M.; Sint, S.; Vierhauser, M.; Wortmann, A.; & Wimmer, M.:** Digital Twin Platforms: Requirements, Capabilities, and Future Prospects. IEEE Software, 01, Article 01. https://doi.org/10.1109/MS.2021.3133795

**Mesmer, P.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern - Methoden zur Hysteresekompensation. Robotik und Produktion, 09/2021, 26–27

**Mesmer, P.; Neubauer, M.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Challenges of Linearization-based Control of Industrial Robots with Cycloidal Drives. 2021 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM). 2021 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), Kashiwa, Japan

**Neubauer, M.; Brenner, F.; Hinze, C.; & Verl, A.:** Cascaded sliding mode position control (SMC-PI) for an improved dynamic behavior of elastic feed drives. International Journal of Machine Tools and Manufacture. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103796

**Neubauer, M.; & Lechler, A.:** Software-defined Manufacturing für die Industrie. SPS-Magazin, 2021(12), Article 12

**Neubauer, M.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Genauigkeits- und Dynamiksteigerung bei Industrierobotern: Auf die Dämpfung kommt es an. Industrieanzeiger, 2021(1), Article 1

**Neubauer, M.; & Meier, M.:** Forschungsprojekt entwickelt Software-defined Manufacturing: Autoindustrie setzt Fertigung neu auf. SPS-Magazin, 2021(13), Article 13

**Neubauer, M.; Mesmer, P.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Schwingungsdämpfung am Industrieroboter: Ein semi-aktiver Ansatz zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens. wt Werkstatttechnik online, 111(9), Article 9. https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-09-48

**Pfeiffer, J.; & Wortmann, A.:** Towards the Black-Box Aggregation of Language Components. 2021 ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (MODELS-C), 576–585. https://doi.org/10.1109/MODELS-C53483.2021.00088

**Qi, Y.; Zhong, R.; Kaiser, B.; Tahouni, Y.; Wagner, H. J.; Verl, A.; & Menges, A.:** Augmented Accuracy: A Human-Machine Integrated Adaptive Fabrication Workflow for Bamboo. In V. Stojakovic & B. Tepavcevic (Hrsg.), Proceedings of the 39th eCAADe Conference (Bd. 1, S. 345–354). Cumincad. http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2021_169

**Reichenbach, T.; Rausch, K.; Trautwein, F.; Pott, A.; & Verl, A.:** Velocity Based Hybrid Position-Force Control of Cable Robots and Experimental Workspace Analysis. In M. Gouttefarde, T. Bruckmann, & A. Pott (Hrsg.), Cable-Driven Parallel Robots (S. 230–242). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75789-2_19

**Reichenbach, T.; & Verl, A.:** Seilroboter im prüfenden Blick, Hochdynamikuntersuchung von Seilwinden mit Kunststofffaserseilen. In S. Matthiesen, S. Wartzack, & D. Zimmer (Hrsg.), Konstruktion (Nr. 4; Konstruktion, Nummer 4, S. 40). VDI fachmedien

**Reiff, C.; Bubeck, W.; Krawczyk, D.; Steeb, M.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Learning Feedforward Control for Laser Powder Bed Fusion. Procedia CIRP, 96, 127–132. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.064

**Reiff, C.; Buser, M.; Betten, T.; Onuseit, V.; Hoßfeld, M.; Wehner, D.; & Riedel, O.:** A Process-Planning Framework for Sustainable Manufacturing. Energies, 14(18), Article 18. https://doi.org/10.3390/en14185811





**Schmidt, A.; Kotschote, C.; & Riedel, O.:** Supervised learning based observer for in-process tool offset estimation in robotic arc welding applications. 2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 1991–1996. https://doi.org/10.1109/CASE49439.2021.9551533

**Schmidt, A.; Kotschote, C.; & Riedel, O.:** In-Process Workpiece Geometry Estimation for Robotic Arc Welding based on Supervised Learning for Multi-Sensor Inputs. 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 722–728. https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9561500

**Schmidt, A.; Schellroth, F.; Fischer, M.; Allimant, L.; & Riedel, O.:** Reinforcement learning methods based on GPU accelerated industrial control hardware. Neural Computing and Applications. https://doi.org/10.1007/s00521-021-05848-4

**Schmucker, B.; Trautwein, F.; Semm, T.; Lechler, Armin.; Zaeh, M. F.; & Verl, Alexander.:** Implementation of an Intelligent System Architecture for Process Monitoring of Machine Tools. Procedia CIRP, 96, 342–346. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.097

**Schulte, A.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Konzeption eines zweiachsigen Impulsaktors. wt Werkstattstechnik online, 111(05), Article 05. https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-05-16

**Steinle, L.; Lechler, A.; Neubauer, M.; & Verl, A.:** Experimental investigation into the implications of transmission errors for rack-and-pinion drives. Production Engineering Research and Development. https://doi.org/10.1007/s11740-021-01090-y

**Steinle, L.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Antrieb im Gleichlauf. Industrial Production, 8–9, 50–52

**Tinsel, E.-F.; Riedel, O.; & Verl, A.:** Smartes Assistenzsystem zur Anforderungserhebung. wt Werkstattstechnik online, 111, 295–299. https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-05-29

**Trautwein, F.; Reichenbach, T.; Pott, A.; & Verl, A.:** Workspace Planning for In-Operation-Reconfiguration of Cable-Driven Parallel Robots. In M. Gouttefarde, T. Bruckmann, & A. Pott (Hrsg.), Cable-Driven Parallel Robots (S. 182–193). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75789-2_15

**von Arnim, C.; Lechler, A.; & Riedel, O.:** Operations for non-disruptive modification of real-time network schedules. 2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 1, 1131–1137. https://doi.org/10.1109/ICIT46573.2021.9453586

**Walker, M.:** Sichere Integration von Containertechnologien in Steuerungssysteme. SPS-Magazin, 08/2021, Article 08/2021

**Wnuk, M.; Hinze, C.; Zürn, M.; Pan, Q.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Tracking Branched Deformable Linear Objects With Structure Preserved Registration by Branch-wise Probability Modification. 2021 IEEE 27th International Conference on Machatronics and Machine Vision in Practice

**Wnuk, M.; Jaensch, F.; Tomzik, D. A.; Chen, Z.; Terfurth, J.; Kandasamy, S.; Shahabi, J.; Garrett, A.; Mahmoudinezhad, M. H.; Csiszar, A.; Xu, W.; Röhrle, O.; & Verl, A.:** Challenges in Robotic Soft Tissue Manipulation—Problem Identification Based on an Interdisciplinary Case Study of a Teleoperated Drawing Robot in Practice.: Bd. Mechatronics and Machine Vision in Practice 4 (J. Billingsley & B. Peter, Hrsg.; S. 245–262). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43703-9_20

**Wnuk, M.; Zürn, M.; Hinze, C.; Lechler, A.; & Verl, A.:** Simulationsbasierter Beobachter für die Handhabungbiegeschlaffer Bauteile. antriebstechnik, 7, Article 7. https://digital.antriebstechnik.de/antriebstechnik-7-2021/65722079/38

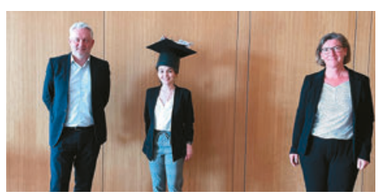
**Wulle, F.; Richter, M.; Hinze, C.; & Verl, A.:** Time-optimal Path Planning of Multi-axis CNC Processes Using Variability of Orientation. Procedia CIRP, 96, 324–329. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.095

**Zürn, M.; Wnuk, M.; Hinze, C.; Lechler, A.; Verl, A.; & Xu, W.:** Kinematic Trajectory Following Control For Constrained Deformable Linear Objects. 2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 1701–1707. https://doi.org/10.1109/CASE49439.2021.9551613

**Zürn, M.; Wnuk, M.; Lechler, A.; Steiler, C.; Paukner, M.; Trommnau, J.; Weiß, B.; Minsch, N.; Mittermeier, M.; Hessler, U.; & Pollner, R.:** Leitungen automatisch im Kfz montieren. Industrial Production, 7, Article 7. https://www.industrial-production.de/montagetechnik/leitungen-automatisch----im-kfz-montieren.htm

## WEITERE ISW-EVENTS

**Zur Förderung der Kommunikation zwischen ehemaligen, aktiven und zukünftigen ISW'lern finden über das ganze Jahr verteilt zahlreiche Events statt.**



Dr. F. Kretschmer, Dr. S. Höhr und Dr. A. Atmosudiro mit der Prüfungskommission nach bestandener mündlicher Doktorprüfung, 2021

Dr. C. Dripke, Dr. K. Kübler und Dr. M. Mottahedi mit der Prüfungskommission nach bestandener mündlicher Doktorprüfung, 2021

Dr. Ph. Sommer und Dr. F. Wulle mit der Prüfungskommission nach bestandener mündlicher Doktorprüfung, 2022

Das jährliche Hoffest am ISW

Das verlorene alljährliche PROF-Spiel verpflichtet die Institutsleitung ein gemeinsames Weißwurstfrühstück für alle ISW'ler und ISG'ler zu sponsern

WGP-Fußballturnier, August 2022

Institutsausflug: Weingut Zeißerei und Paddeln am Neckar, 2022

Unsere Weihnachtsfeier fand in der Alten Reithalle, Hotel Maritim, statt

# WIR SUCHEN JUNGE, NEUGIERIGE FORSCHER

## HIGH PERFORMANCE AUTOMATISIERUNG!

**Das Institut für Steuerungstechnik (ISW) der Universität Stuttgart ist eines der führenden Forschungsinstitute auf dem Gebiet der Steuerungs- und Antriebstechnik.**

© Ludmilla Parsyak, ISW Uni Stuttgart

Das ISW bietet einen Arbeitsplatz mit interessanten und technisch innovativen Aufgabengebieten in unterschiedlichen Teilbereichen auf höchstem internationalem Niveau. Unsere Absolvierende findet man in den Spitzenpositionen des nationalen und internationalen Maschinenbaus.

Für Absolvierende der Mechatronik, Kybernetik und angrenzender Disziplinen wie Informatik, Maschinenbau und Elektrotechnik bietet das ISW ein ausgezeichnetes Umfeld. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter entwickeln und bearbeiten Sie selbstständig äußerst anspruchsvolle Projekte mit gleichzeitig höchster Entfaltungsmöglichkeit. In den Projekten stehen wissenschaftliche Erfahrungen, interdisziplinäres Fachwissen, Kreativität und Managementfähigkeiten im Mittelpunkt. Es handelt sich bei den Projekten sowohl um grundlagenorientierte als auch um industrienahe Themen. Außerdem wird die Möglichkeit zur Promotion an einer weltweit angesehenen, wissenschaftlichen Einrichtung im Bereich der Steuerungs- und Antriebstechnik gegeben.

## HABEN WIR IHR INTERESSE GEWECKT?

**DANN FREUEN WIR UNS AUF IHRE BEWERBUNG.**

**Aktuelle Stellenangebote finden Sie unter**
**www.isw.uni-stuttgart.de**

Universität Stuttgart

**Kontakt:**
Dr.-Ing. Armin Lechler
armin.lechler@isw.uni-stuttgart.de

Institut für Steuerungstechnik
Seidenstr. 36
70174 Stuttgart





# KONTAKT

**Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)**
**Universität Stuttgart**

Seidenstraße 36, 70174 Stuttgart
T +49 711 685-82410
F +49 711 685-72410

info@isw.uni-stuttgart.de
www.isw.uni-stuttgart.de

**ANFAHRT**

**Mit dem Auto:**
Aus Richtung München oder Karlsruhe A8, Ausfahrt 52b Stuttgart-Degerloch. Der B27 folgen in Richtung Stuttgart Zentrum. Ab Charlottenplatz weiter auf der Schloßstraße bis Berliner Platz, dann rechts in die Seidenstraße abbiegen.

**Öffentliche Verkehrsmittel:**
Ab Stuttgart-**Hauptbahnhof** mit dem Bus 42 (Richtung Erwin-Schoettle-Platz) bis Haltestelle Rosenberg-/Seidenstraße oder vom Rotebühlplatz/**Stadtmitte** mit der U4 (Richtung Hölderlinplatz) oder mit dem Bus 43 (Richtung Killesberg) bis Haltestelle Rosenberg-/Seidenstraße.

Ab Stuttgart-**Flughafen** mit der S2 (Richtung Schorndorf) oder S3 (Richtung Backnang) bis Haltestelle Rotebühlplatz/Stadtmitte, dann Stadtbahn Linie U4 (Richtung Hölderlinplatz) oder mit dem Bus 43 (Richtung Killesberg) bis Haltestelle Rosenberg-/Seidenstraße.

## BESUCHEN SIE UNS

https://de.linkedin.com/company/isw-uni-stuttgart

https://www.instagram.com/isw_unistuttgart

https://twitter.com/iswunistuttgart

https://de.industryarena.com/isw-uni-stuttgart

https://www.xing.com/companies/institutfürsteuerungstechnikderwerkzeugmaschinen-undfertigungseinrichtungen

https://www.facebook.com/iswunistuttgart

# IMPRESSUM

**ISSN:** 1614-8185

**Schutzgebühr:** 5,00 Euro

**Herausgeber:**

Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen
in Zusammenarbeit mit
ALPHA Informationsgesellschaft mbH

**Redaktionelle Zusammenarbeit:**

Institut für Steuerungstechnik
der Werkzeugmaschinen
und Fertigungseinrichtungen
Universität Stuttgart
Seidenstraße 36
70174 Stuttgart

Inga Deines
T: +49 711 685-83880
inga.deines@isw.uni-stuttgart.de

Xenia Günther
T: +49 711 685-82453
xenia.guenther@isw.uni-stuttgart.de

www.isw.uni-stuttgart.de

**Bildnachweis:**
Soweit nicht anders gekennzeichnet
© Copyright 2023 – Universität Stuttgart ISW

**Anzeigenverwaltung/Gesamtherstellung:**

ALPHA Informationsgesellschaft mbH
Finkenstraße 10
68623 Lampertheim
T: +49 (0)6206 939-0
www.alphapublic.de

Die Informationen in diesem Heft sind sorgfältig geprüft worden, dennoch kann für die Richtigkeit keine Garantie übernommen werden. Eine Haftung für Personen-, Sach- und Vermögensschäden ist ausgeschlossen.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, des Vortrags, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung des Werkes oder von Teilen des Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechts der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechts.

Projekt-Nr. 3-342

© ALPHA Informationsgesellschaft mbH, Lampertheim und ISW



STUTTGARTER INNOVATIONSTAGE

**TRENDS UND INNOVATIONEN RUND UM DAS THEMA STEUERUNGSTECHNIK UND DIGITALISIERUNG**

Die hohe Skalierbarkeit und der Ressourcenreichtum von Cloud-Plattformen sollen auch für die Steuerungstechnik nutzbar gemacht werden. Dieser Gedanke war 2017 Grundlage der ersten Veranstaltung „Stuttgarter Innovationstage – Steuerungstechnik aus der Cloud". Inzwischen wird die Veranstaltung jährlich durchgeführt und informiert über die aktuellen Trends und Innovationen rund um das Thema Steuerungstechnik und Digitalisierung.

Weitere Informationen zur nächsten Veranstaltung finden Sie unter:

**www.stuttgarter-innovationstage.de**

ORGANISATION ISW VERANSTALTER FISW

LageRegelSeminar

**Lageregelseminar**

Auf der zweitägigen Veranstaltung geben unsere Referenten aus Industrie und Forschung einen spannenden Überblick zu aktuellen Forschungsergebnissen und Entwicklungen aus der Robotik, Antriebs- und Maschinentechnik und der Additiven Fertigung. Hierfür werden praxisbezogene experimentelle Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

Weitere Informationen zur Veranstaltung finden Sie unter:

**www.lageregelseminar-stuttgart.de**

ORGANISATION ISW VERANSTALTER FISW

**Universität Stuttgart**
Institut für Steuerungstechnik
der Werkzeugmaschinen und
Fertigungseinrichtungen