Abschlussbericht

Erhöhung der Gesamtanlageneffektivität – Entwicklung resilienter agentenbasierter Automatisierungssysteme für den Maschinen- und Anlagenbau (Resi4MPM)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser
Technische Universität München
School of Engineering and Design
Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme (AIS)

Deutsche Forschungsgemeinschaft
Kennedyallee 40 · 53175 Bonn · Postanschrift: 53170 Bonn
Telefon: + 49 228 885-1 · Telefax: + 49 228 885-2777 · postmaster@dfg.de · www.dfg.de

1 Allgemeine Angaben

DFG-Geschäftszeichen: VO 937/46-1

Projektnummer: 468717655

Titel des Projekts: Enhancement of the Overall Equipment Effectiveness of Factories – Development of Resilient Agent-Based Automation Systems for Machine and Plant Manufacturing Industry (Resi4MPM)

Name der Antragstellerin: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser

Dienstanschrift:

TU München, Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching bei München

Name der Kooperationspartner: Prof. Dr. Fan-Tien Cheng, Asst.-Prof. Dr. Yu-Ming Hsieh

Berichtszeitraum (gesamte Förderdauer): 01.01.2022 – 31.12.2025

2 Zusammenfassung / Summary

2.1 Deutsche Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt Resi4MPM hatte das Ziel, die Resilienz von Produktionssystemen zu erhöhen, um die Overall Equipment Effectiveness (OEE) zu verbessern. Da unerwartete Stillstände die Verfügbarkeit und Leistung automatischer Produktionssysteme erheblich beeinträchtigen, wurde eine Kombination aus cloudbasierter vorausschauender Wartung der Partneruniversität NCKU und feldnaher Automatisierung an der TUM entwickelt. Die Integration von Echtzeitüberwachung und intelligenter Entscheidungsfindung reduziert Ausfälle, optimiert Wartungsstrategien und ermöglicht ein adaptives Systemverhalten. Ein Intelligentes Prädiktives Wartungssystem (IPM) wurde hierzu weiterentwickelt, um genauere Restlebensdauer- (RUL) Prognosen zu erstellen. Ergänzend wurde ein Automatisierungsframework entwickelt, das deterministisches Maschinenverhalten auch bei Störungen sicherstellt. Drei Anwendungsfälle wurden bearbeitet: die Kompensation von Komponentenfehlern, eine Anomalieerkennung und Alarmbehandlung sowie ein automatisierter Neustart, bei dem Maschinen mit minimalem manuellem Eingriff den Betrieb wieder aufnehmen können.

Zur Unterstützung dieser Ziele wurden automatisch extrahiertes Wissen aus technischen Dokumenten sowie maschinelles Lernen zur Fehlerbehandlung untersucht. Diese Ansätze erleichtern die industrielle Anwendbarkeit durch Reduzierung manueller Konfigurationsaufwände und Verbesserung der Systemanpassungsfähigkeit.

Nach einer Anforderungsanalyse in Zusammenarbeit mit Industriepartnern wurden Vorarbeiten von TUM und NCKU in einem verteilten, cloudbasierten System integriert. Wissensbasen wurden durch eine Kombination aus automatisierter Datenauswertung und manueller Expertenbefragung erstellt. Action Spaces wurden realisiert, die eine adaptive Fehlerkompensation im Rahmen der zulässigen Toleranzen sichert, während Recovery-Strategien auf Basis von Zustandsautomaten entwickelt wurden. Entwickelte Konzepte wurden sowohl im Labor als auch in industriellen Umgebungen validiert.

Mit diesen Entwicklungen hat Resi4MPM zur Weiterentwicklung resilienter Produktionssysteme beigetragen. Die Kombination aus adaptiver Automatisierung und prädiktiver Wartung reduziert Stillstandszeiten, erhöht die Effizienz und flexibilisiert Reaktionen auf unerwartete Störungen, wodurch die industrielle Resilienz gestärkt wurde.

2.2 English Summary

The Resi4MPM research project aimed to increase the resilience of production systems to improve Overall Equipment Effectiveness (OEE). Since unexpected downtimes significantly impair the availability and performance of automated production systems, a combination of cloud-based predictive maintenance from partner university NCKU and field-level automation concepts at TUM was developed. The integration of real-time monitoring and intelligent decision-making reduces failures, optimizes maintenance, and enables adaptive system behavior.

An Intelligent Predictive Maintenance (IPM) system was further developed to generate more accurate Remaining Useful Life (RUL) predictions. In addition, an automation framework was developed that ensures deterministic machine behavior even in the presence of faults. Three use cases were addressed: compensation of component failures, anomaly detection and alarm handling and an automated restart with minimal manual intervention.

To support these objectives, automatically extracted knowledge from technical documents and machine learning for fault handling were explored. These approaches facilitate industrial applicability by reducing manual configuration efforts and improving the system's adaptability.

Following a requirements analysis in collaboration with industry partners, preliminary work by TUM and NCKU was integrated into a distributed, cloud-based system. Knowledge bases were created through a combination of automated data analysis and manual expert interviews. Action Spaces were implemented to enable adaptive fault compensation within acceptable tolerances, while recovery strategies based on finite state machines were developed. The developed concepts were validated in both laboratory and industrial environments.

With these developments, Resi4MPM contributed to the advancement of resilient production systems. The combination of adaptive automation and predictive maintenance reduces downtime, increases efficiency, and enhances flexibility in response to unexpected disruptions, thus strengthening industrial resilience.

3 Wissenschaftlicher Arbeits- und Ergebnisbericht

3.1 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

Produktionssysteme stehen unter hohem Wettbewerbsdruck, wodurch eine hohe Anlagenverfügbarkeit und Effizienz – gemessen an der OEE – entscheidend sind. Ungeplante Stillstände durch Fehler in Automatisierungskomponenten mindern diese Effizienz erheblich. Bestehende Ansätze zur Fehlerkompensation und -analyse sind oft zentralisiert, nicht skalierbar oder zu rechenintensiv für den industriellen Einsatz auf Feldebene. Es fehlt an robusten, verteilten Systemen, die in Echtzeit auf Störungen reagieren können und sich gleichzeitig dynamisch an veränderte Bedingungen anpassen.

3.2 Projektspezifische Ergebnisse und Erkenntnisse

Das Projekt erhöht die OEE durch eine gesteigerte Resilienz der Automation. Im Mittelpunkt steht dabei die Vermeidung ungeplanter Stillstände, die automatisierte Kompensation von Ausfällen und (teil-) automatische Neustarts von Maschinen über eine verteilte Automationsarchitektur, die robuste Entscheidungen auch bei begrenzten Ressourcen auf Feldebene ermöglicht (vgl. Bild 1). SPS-gesteuerte Ressourcen im Feld werden durch *Resource Agents* verwaltet, die wiederum über *Cyber-Physical Agents* mit dem *intelligent Factory Automation* (iFA) Framework der Partneruniversität NCKU interagieren.

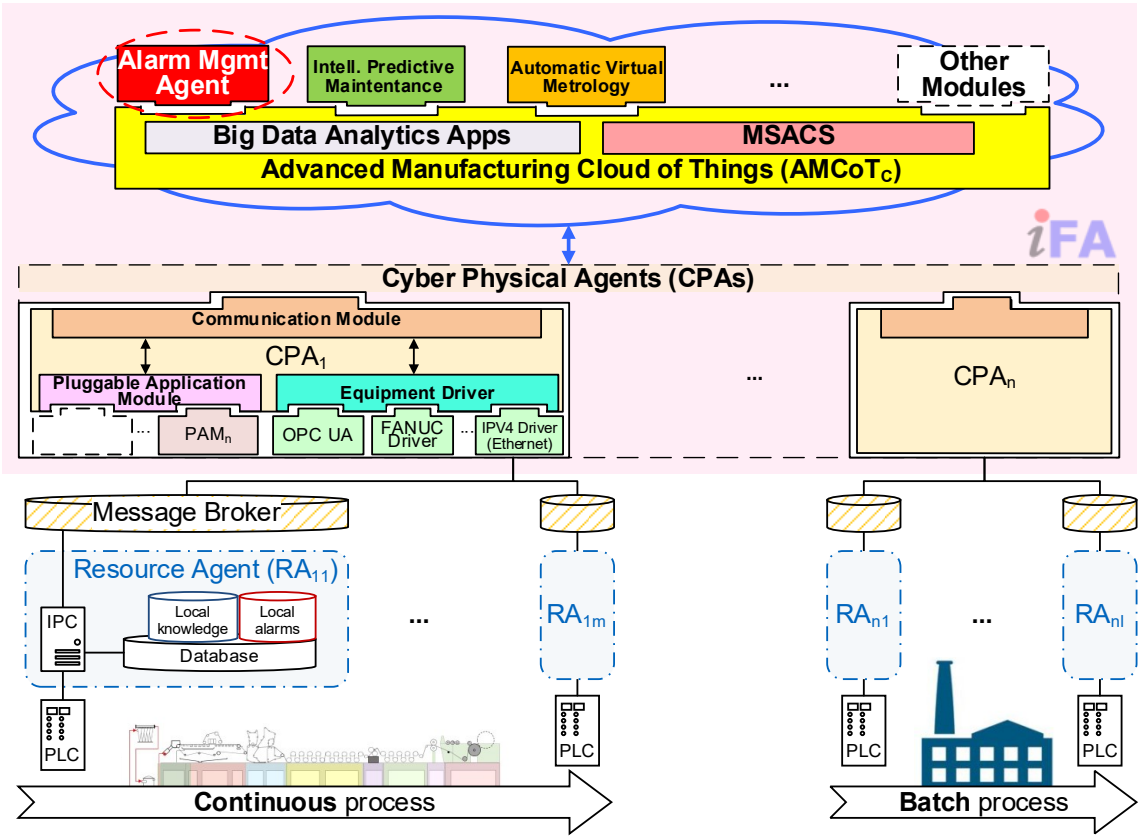

Bild 1. Integrierende Automationsarchitektur als Basis der unten detaillierten Projektbestandteile [1].

Die Projektpartner der NCKU entwickelten cloudbasierte Technologien, die über vorausschauende Wartung zur OEE-Steigerung beitragen. Im Fokus standen die Entwicklung einer präziseren Vorhersage der verbleibenden RUL und eine optimierte Instandhaltungsplanung innerhalb der iFA-Cloudplattform, die durch die Kombination der TUM-seitigen feldnahen Aktivitäten und NCKU-seitigen Überwachungs- und Analyseansätze erfolgreich umgesetzt wurden. Die in 3.2.3 und 3.2.4 beschriebene Steuerungsarchitektur erfasst den hierarchischen Systemzustand detailliert und in Echtzeit und stellt ihn über standardisierte Schnittstellen bereit, um NCKU-Analysen zu präzisieren. Das Ergebnis sind Rekonfigurationsbedarfe, bspw. um einem Ausfall vorzubeugen oder ihn zu beheben, die durch die neue Steuerungsarchitektur automatisch und echtzeitfähig umsetzbar werden. Da das Projekt als Kollaboration der DFG und Taiwans *National Science and Technology Council* (NSTC) gefördert wurde, referenzieren die im Folgenden zitierten Veröffentlichungen unter Federführung der NCKU (Professor Fan-Tien Cheng, Professor Yu-Ming Hsieh) nicht die DFG, sondern das NSTC als Fördergeber.

3.2.1 *Anforderungsanalyse anhand gemeinsamer Cloud-Architektur zur Alarmanalyse (AP1)*

Zur Anforderungsermittlung wurden existierende Ansätze der Alarm- (TUM) und cloudbasierten Analyse (NCKU) kombiniert [1, 2]. Interviews und Workshops mit Industrievertretern begannen innerhalb der ersten Wochen der Bearbeitung und wurden über das gesamte Projekt hinweg fortgeführt, wie u.a. in [1–7] beschrieben, sowie in nicht veröffentlichten Veranstaltungen der Institute. Laufzeitanforderungen, z.B. Rechenleistung, Energieverbrauch, Speicher und Kommunikation [1–10] wurden ebenso betrachtet wie statisch errechnete Metriken [5, 17].

3.2.2 *Erstellung von Wissensbasen für Resource Agents (AP2)*

Module der entwickelten Architektur und insb. die für einzelne Maschinen- oder Anlagenteile zuständigen *Resource Agents* erfordern Wissensbasen über Produkte, Prozesse und Ressourcen, die zu großen Teilen automatisiert aus Engineering-Dokumenten extrahiert [1, 7] und aus Prozessdaten erlernt wurden (teilweise hybrid [1]). Maschinelles Lernen wurde v.a. für die in späteren Abschnitten detaillierte Anomalie- und Fehleranalyse [2, 4, 6, 11] angewandt.

Zur automatischen Erfassung und Nutzbarmachung müssen den Wissensbasen generalisierte Modelle oder Metamodelle zugrunde liegen [1, 12], die bspw. auch die Entwicklung eines Digitalen Zwillings für die Analyse und Planung ermöglichten [7]. Dabei ist ein arbeitsteiliger Überwachungs-, Analyse- und Steuerungsansatz in der verteilten Architektur entscheidend, inkl. einer Datenvorverarbeitung und Diagnose im Feld [5, 7], dann Weiterverarbeitung über mehrere Abstraktions- und Leistungsebenen [1, 7, 10, 11, 13].

3.2.3 *Erhöhung der Resilienz durch das Action Space Konzept (AP3)*

Der „Action Space“ einer Ressource begrenzt die Menge möglicher automatischer Aktionen, sodass Zuverlässigkeits- und Zeitanforderungen eingehalten werden [a], was bei allen (Re-) Konfigurationen der Feldebene gesichert werden muss [5, 8]. Der Antrag beschreibt hierzu ein

Vorgehen, wobei aus Engineering-Dokumenten (vgl. 3.2.2) Toleranzbäume generiert werden, die jedem Zustand (bspw. an PackML orientiert) jeder Komponente eine Unsicherheit zuweisen. Damit sollte die Erfüllbarkeit einzelner Kompensationen im Rahmen des Action Space berechnet werden. Jedoch sind PackML-orientierte Zustandsmaschinen industriell, wenn überhaupt, nur auf einer hohen Architekturebene vorhanden.

Um den erforderlichen modularisierten und generisch zugänglichen Zustand des Automatisierungssystems herzustellen, wurde im Projektverlauf daher ein stärkerer Fokus als initial geplant auf den Entwurf rekonfigurierbarer Steuerungssoftware gelegt. Es ergaben sich Synergien, die letztlich *einen anderen Ansatz zur Erfüllung des AP3* ermöglichten. So beinhaltet das entwickelte Steuerungssoftwarekonzept [5] zunächst eine Modularisierung des Verhaltens in sog. Control Primitives (kompatibel mit dem Industrie 4.0-Konzept von Skills und Capabilities [3, b]), während der Zustand (d.h. Sensorwerte und aggregierte Informationen wie Schieberegister) in einem über generische Schnittstellen zugänglichen, steuerungsseitigen Repositorium verwaltet wird. Die Control Primitives definieren Vor- und Nachbedingungen [5, 9], welche von globalen und rekonfigurierbaren Verriegelungen ergänzt werden [5, 8]. Sie sind in durch eigene Datenstrukturen repräsentierte Prozeduren eingebettet [8]. Somit ist der Zustand von der physikalischen bis zur Ebene der Betriebsarten generisch zugänglich.

Da alle im vorigen Absatz beschriebenen Konzepte auf SPSen umgesetzt sind, kann der Action Space direkt im Feld unter harten Echtzeitbedingungen gesichert werden. Eine Verletzung von Zeit- oder Zuverlässigkeitsanforderungen wird durch die Verriegelungen, einschließlich der Vor- und Nachbedingungen, überwacht [5, 8]. Ein Verstoß führt zu einem autonomen halten des Prozesses (gemäß der PackML Zustandsmaschine) [5]. Eine detaillierte Diskussion der Fehlerreaktionszeiten ist [5] zu entnehmen.

Indem die beschriebene SPS-Architektur den Prozesszustand einfach überwachbar bereitstellt, kann eine übergeordnete Prozessüberwachung [1] Anomalien identifizieren und Rekonfigurationen auslösen (sog. *Compensation*) [5, 10]. Die Planung der Rekonfiguration nutzt wissensbasierte Prozessmodelle in zwei unterschiedlichen Ansätzen, basierend auf der etablierten Planning Domain Definition Language und einem Graph-basierten Ansatz [7, 9]. Zur Verbesserung der Anomalieerkennung wurden die Intelligent Predictive Maintenance (IPM) Ansätze aus Vorarbeiten der NCKU verbessert [c] und eine multivariate Variante entwickelt [6]. Da der Prozesszustand mechatronischer Systeme nur eingeschränkt überwachbar ist, wurde zudem direkt im Feld die Definiertheit von Werten gesichert [5]. Auf höheren Analyseebenen erfolgt eine auf Prozessmodellen basierende virtuelle Metrologie [4].

3.2.4 *Erhöhung der Resilienz durch „Retracing“ nach einem Fehler (AP4)*

Retracing beschreibt die Idee, nach einem Fehler die Zustandsmaschine(n) des Automatisierungssystems zurückzuverfolgen, bis in den letzten Zustand, der erreichbar ist und als sicherer

Restart State gilt. Hierzu wird auf die in 3.2.3 beschrieben Prozedurstrukturen und Control Primitives aufgebaut [5, 9]. Ihre Vor- und Nachbedingungen dienen einerseits der automatischen Diagnose auf der Feldebene [5], können gleichzeitig aber auch den Zielzustand einer *Recovery* (im Antrag „Restart“ genannt) nach einem Fehler charakterisieren [5, 7]. Ein umfassenderes Retracing erfordert neben der SPS auch das Zusammenspiel mit dem Resource Agent, der die Zustandswechsel aller Control Primitives verfolgt und im Fehlerfall an einen Planer weitergibt, der wiederum Restart States anhand eines Abgleichs zwischen der konfigurierten Prozedur und dem tatsächlichen Ablauf identifiziert [7]. Als Grundlage der automatischen Planung von Recoveries können Systemmodelle, bspw. aus Engineering-Dokumenten, in SysML v2 formalisiert werden und anschließend bspw. der Generierung digitaler Zwillinge [12] und Domänenmodelle für automatisches Planen und Scheduling dienen [7]. Ein zweiphasiges Planungs- und Ausführungskonzept für hochflexible Logistiksysteme (bspw. Magnetschweber), erlaubt dynamische Routenänderungen in harter Echtzeit [14].

Vom Resource Agent an die Feldebene übermittelte Rekonfigurationen unterliegen den Verriegelungen inkl. Vor- und Nachbedingungen der Control Primitives, sodass der *Action Space* gesichert wird [8]. Die verteilte Architektur von Feld- bis Cloudebene ermöglicht außerdem Vorverarbeitungsschritte einer Alarmanalyse [1], die dann wiederum die Anomalieerkennung unterstützt [2], um frühzeitig den Bedarf einer Rekonfiguration zu indizieren [10, 11].

Industrielle Evaluationen haben gezeigt, dass der hier und in 3.2.3 beschriebene Ansatz zur Flexibilisierung und Resilienzsteigerung der Feldautomatisierung anwendbar und skalierbar ist, aber zu unflexibel gegenüber unternehmensspezifischen Randbedingungen und Zielen, sodass hier zukünftige Arbeiten nötig sind [17] (Details in Abschnitt 0).

3.2.5 *Schnittstelle zur „intelligent Factory Automation“ des Partnerinstituts (AP5)*

Um die zuvor beschriebenen Module für bspw. Überwachung, Analyse, Planung und Steuerung in das in Bild 1 skizzierte Architekturkonzept zu integrieren, wurde ein besonderer Fokus auf interoperable Schnittstellen, Algorithmen und Datentypen gelegt. Die so entwickelten Module umfassen Verbesserungen der Anomalieerkennung, die wiederum als Grundlage des Use Case Compensation (AP3, 3.2.3) dienen [10, 11]. Sie adressieren die Analyse von Ereignissen und Alarmen in der Mensch-Maschine-Schnittstelle [1, 2], Softsensoren und virtuelle Metrologie [4, 10] und verbesserte Methoden zur vorausschauenden Wartung [6, 11].

Für die Verarbeitung und Planung von Prozeduren, insb. Recoveries, wurden ebenfalls webbasierte Module entwickelt, die mit der iFA-Cloud kompatibel sind. Sie erleichtern die Interaktion mit dem technischen Prozess durch eine Abstraktion von Skills, Capabilities und Services [3] und realisieren daran anknüpfend die Planung von (Recovery) Prozeduren [7, 9]. Die Schnittstellen zwischen Resource Agents und der iFA über CPAs bauen auf etablierte Protokolle und Technologien wie MQTT [10], OPC UA [3] oder REST [7] auf.

3.2.6 *Prototypische Implementierung eines integrierten Systems (AP6)*

Die konzeptionierten Informationsmodelle, Analyse-, Konfigurations- und Ausführungsalgorithmen zur Resilienzsteigerung der Feldautomatisierung wurden in mehreren Evaluationen vollständig implementiert. Alle Aspekte der Steuerung auf Feldebene wurden in den industrieüblichen SPS-Programmiersprachen der IEC 61131-3 programmiert, um einerseits eine einfache Übertragbarkeit in die Industrie und andererseits Echtzeitfähigkeit zu sichern. Dabei sind nicht nur die verwendeten Sprachen gleich, sondern existierender Code kann in der entworfenen Architektur in großen Teilen weiterverwendet werden [5, 17]. Teile der SPS-Programmierung wurden als Nachweis der Übertragbarkeit zusätzlich in C/C++ re-implementiert, die dann jedoch ein komplexeres Zeitverhalten aufweisen [5, 17].

Nicht-Echtzeitanwendungen wie Resource Agents, Cyber Physical Agents und Komponenten der iFA wurden in den verbreiteten Sprachen Python und C# programmiert, wie z.B. in [1, 3, 7, 9, 10, 11] beschrieben. Es wurden Werkzeuge wie der CODESYS UML Editor (adaptiert in Beckhoff TwinCAT) und Matlab/Simulink zur Erzeugung ausführbarer Steuerungs- und Analyseprogramme benutzt. Neben den zitierten wissenschaftlichen Veröffentlichungen (zwei davon Open Access [1, 5]) sind die prototypischen Implementierungen der Feldebene offen verfügbar dokumentiert: Zwei Entwicklungszweige des offenen Forschungsdemonstrators *extended Pick and Place Unit* (xPPU) veranschaulichen sämtliche Aspekte des entwickelten Steuerungskonzepts[1] und zehn Videos illustrieren die Anwendungsfälle[2][3].

3.2.7 *Evaluation der Konzepte in Labor und Industrie (AP7)*

Die Implementierungen erstrecken sich über Industrieanwendungen und Anwendungen im Labor, von denen einige wiederum durch industrielles Feedback validiert wurden. Die verteilte Alarmanalysearchitektur [1] (AP1, 2, 5) erfolgte an Daten und mithilfe von Engineering-Wissen und -Dokumenten einer hybriden Anlage zu Fleeceproduktion. Sie wurde vorbereitet durch die verteilte Anomalieanalyse und Kompensation der xPPU [10, 11]. Spätere Arbeiten zur Prozessüberwachung und Analyse wurden als Module neben dem *Alarm Management Agent* (Bild 1, oben links) entwickelt und verwenden kompatible Schnittstellen. Sie umfassen die Rückverfolgung von Defekten auf Alarmmeldungen während des Packagings von Halbleiter-Chips [2] (AP1, 5), Verbesserung der Überwachungsgenauigkeit in der LCD-Panel-Produktion durch modellbasierte Auswahl der relevantesten Messwerte für eine virtuelle Metrologie [4] (AP1, 2, 5) und eine verbesserte Anomalieerkennung durch einen multivariaten Ansatz in der Qualitätsprüfung von Halbleiter-Chips [6] (AP3, 5).

[1] https://github.com/x-PPU/PLC-Reconfiguration (Branches „main" und „ICPS-2025")
[2] https://www.youtube.com/playlist?list=PL9Dd9LptzPD9gVM6_zl9hmRRTv17M2iUH
[3] https://www.youtube.com/playlist?list=PL9Dd9LptzPD_VKHDar5ud18uLCsN_aa-5

Aspekte der resilienten Automation auf der Feldebene (AP3, 4) wurden ebenfalls am xPPU-Demonstrator vorbereitet [5, 9, 10], dann in mehreren industriellen Anwendungen validiert. Sie umfassen dynamisch rekonfigurierbare, in Echtzeit ablaufende Testprozeduren für Hydraulikkomponenten [5, 16] (AP4) und die dynamische Anpassung eines Produktionsprozesses auf neue Produktvarianten in der Produktion von Hydraulikkomponenten [5] (AP3, 4). Schließlich wurden sämtliche Aspekte, erweitert um voll änderbare Prozeduren und über SPSen verteilte Steuerung [3, 8] sowie vollautomatisch diagnostizierte und umgesetzte Recoveries [7], an der xPPU zusammengeführt. Ein interaktiver Workshops mit 17 Experten aus acht internationalen Unternehmen bewertete Skalierbarkeit und Anwendbarkeit sehr positiv und offenbarte weitere Forschungsrichtungen [17] (vgl. Abschnitt 5). Die Erlernbarkeit als Teil der Anwendbarkeit wurde ebenfalls überwiegend positiv in einer Evaluation mit Studierenden untersucht [17].

3.3 Abweichungen vom Konzept

Wie in 3.2.3 eingeführt und in 3.2.4 weiter detailliert, wurden die im Antrag gesetzten Ziele erreicht, allerdings durch Ansätze, die insgesamt stärker die SPS-basierte Automation der Feldebene fokussieren. Aufgrund der engen Zusammenarbeit mit industriellen Partnern war es entscheidend Ansätze zu entwickeln, die sich in bestehende Automationsarchitekturen integrieren, was wiederum das Modularisierungs- und Flexibilisierungskonzept der Feldebene beeinflusste. Im Ergebnis ähneln die entwickelten Konzepte weniger einem Multiagentensystem, als es der Antrag skizziert. Die Abstraktion durch Agenten wurde nicht auf der Feldebene (SPS), sondern erst durch die Interaktion von Resource Agents, Cyber Physical Agents [1, 10, 11] und iFA realisiert [1, 2, 4, 6, 11]. Das hierarchische Agentensystem erlaubt die Abstraktion und Vorverarbeitung gesammelter Daten [1, 7, 10, 11] sowie das Übersetzen von Steuerungsstrategien in konkrete Prozeduren für die Feldebene [3, 7, 9, 10].

Das SPS-Automationskonzept erreicht die Rekonfigurierbarkeit der Feldebene bei Erhalt industrieller Anforderungen [5, 8, 9]. Insbesondere die Projektziele aus den zentralen APs 3 und 4 [3, 5, 7–9, 16] sowie AP2 [7, 9, 12] wurden darauf aufbauend umgesetzt. Ebenso wurde die Sicherung des Action Space anders umgesetzt als im Antrag konzipiert, wie in 3.2.3 beschrieben. Während das Rekonfigurationskonzept mehrfach industriell validiert wurde [5, 16, 17], gilt dies nicht für das automatische Fehlerhandling (Recovery und Compensation, vgl. 3.2.3, 3.2.4). Hierzu ist eine mechanische bzw. E/E-Redundanz nötig, die gemäß den befragten Experten industriell meist nicht existiert. Jedoch wurden sämtliche Ansätze auf Demonstratoren implementiert und in einem dreistündigen Industrieworkshop evaluiert [17] (vgl. 3.2.7).

3.4 Umgang mit erzielten Ergebnissen und Daten

Das Projekt hatte es nicht zum Ziel Forschungsdaten zu generieren. Die analysierten industriellen Datensätze sind vertraulich [1, 2, 4, 6]. Wie in 3.3 beschrieben, wurden wesentliche

Innovationen durch SPS-Softwarekonzepte erreicht, die in Bibliotheken und Referenzimplementierungen online verfügbar und in der veröffentlichten Literatur dokumentiert sind.

4 Veröffentlichte Projektergebnisse

4.1 Publikationen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung

[1] J. Wilch, B. Vogel-Heuser, J. Mager, R. Cendelin, and T. Fett, “A Distributed Framework for Knowledge-Driven Root-Cause Analysis on Evolving Alarm Data–An Industrial Case Study,” *IEEE R-AL*, vol. 8, no. 6, pp. 3732–3739, 2023.

[2] Y.-M. Hsieh, P.-J. Chen, J. Wilch, B. Vogel-Heuser, C.-Y. Chen, and I.-S. Ng, “Development of an Alarm Pattern Detection Scheme for Managing Alarm Floods in Bumping Process,” *IEEE RA-L*, vol. 10, no. 1, pp. 335–342, 2025.

[3] L. Romier, J. Wilch, and B. Vogel-Heuser, “Coordination and Communication for Online-Reconfigurable Real-Time Distributed Control,” in *IEEE ICPS*, Emden, Germany, 2025, pp. 1–7.

[4] Y.-M. Hsieh, C.-T. Liu, S.-Y. Huang, C. Li, J. Wilch, and B. Vogel-Heuser, “Developing the Keep-Important-Samples Scheme for Training the Advanced CNN-Based Automatic Virtual Metrology Models,” *IEEE RA-L*, vol. 9, no. 9, pp. 7931–7938, 2024.

[5] J. Wilch, F. Sax, S. Rüth, Y.-M. Hsieh, F.-T. Cheng, and B. Vogel-Heuser, “Enhancing the Resilience of IEC 61131-3 Software with Online Reconfigurations for Fault Handling,” *IEEE T-ASE*, no. 22, 12436-12454, 2025.

[6] Y.-M. Hsieh, C.-Y. Lin, J. Wilch, B. Vogel-Heuser, Y.-C. Lin, and Y.-C. Lin, “An Intelligent Factory Automation System With Multivariate Time Series Algorithm for Chip Probing Process,” *IEEE RA-L*, vol. 8, no. 9, pp. 5464–5471, 2023.

[7] S. Gaiardelli, J. Wilch, F. Fummi, and W. Vogel-Heuser, “Automatic Recovery Planning and Execution Architecture for IEC 61131-3 Controlled Machinery,” in *IEEE IECON*, Madrid, Spain, 2025, pp. 1–7.

[8] J. Wilch and B. Vogel-Heuser, “Field-level Reconfiguration of Real-time Distributed PLC Operating Procedures,” in *IEEE ICPS*, Emden, Germany, 2025, pp. 1–8.

[9] Y. Lei, J. Wilch, B. Rupprecht, and B. Vogel-Heuser, “Artificial Intelligence Planning of Failure Recovery Strategies in Discrete Manufacturing Automation,” in *IEEE CASE*, 2023, pp. 1–8.

[10] J. Wilch, B. Vogel-Heuser, Y.-M. Hsieh, and F.-T. Cheng, “A Communication Architecture to Observe and Preserve Efficiency in Automated Production Systems,” in *IEEE CASE*, 2022, pp. 335–340.

[11] Y.-M. Hsieh, J. Wilch, C.-Y. Lin, B. Vogel-Heuser, and F.-T. Cheng, “Analysis of Process Data for Remote Health Prediction in Distributed Automation Systems,” in *IEEE CASE*, 2022, pp. 1289–1294.

[12] S. Gaiardelli, J. Wilch, F. Fummi, and B. Vogel-Heuser, “Automating CPPSs Analyses with SysML v2 and Lingua Franca in the Context of Industry 4.0,” in *IEEE IECON*, Chicago, USA, 2024, pp. 1–8.

[13] M. Gnadlinger, D. Tilbury, K. Barton, J. Wilch, and B. Vogel-Heuser, „Requirement-Driven Sharing of Manufacturing Digital Twins Along the Value Chain,” in *IEEE CASE*, 2025, Los Angeles, USA, 2025, pp. 1016-1023.

[14] S. Weindel, J. Wilch, C. Kögel, K. Xiao, and B. Vogel-Heuser, „Interaction-Minimizing Roadmap Optimization for High-Density Multi-Agent Path Finding,” in *IEEE CASE*, 2025, Los Angeles, USA, 2025, pp. 16–23.

[15] J. Höfgen, N. Thi Huyen Tran, B. Vogel-Heuser, P. Chen, J. Wilch, F. Cheng and Y. Hsieh, “Deploying Vision Retrieval Augmented Generation as Assistant for xPPU Maintenance,” in *IEEE CASE*, 2025, Los Angeles, USA, 2025, pp. 1950–1955.

4.2 Weitere Publikationen und öffentlich gemachte Ergebnisse des Projekts

[16] J. Wilch, B. Vogel-Heuser, S. Rüth, and D. Hujo, „Erste Schritte eines grafischen Logikkonfigurators zur programmierfreien Werker-Konfiguration von Hydraulik-Prüfabläufen," in *Automation 2024* (VDI-Berichte 2437), 1st ed. Düsseldorf: VDI Verlag, 2024, pp. 1015–1026.

[17] J. Wilch, *Reconfigurable Control Software for Adaptability and Resilience in Special-purpose Machinery: Considering Industrial Software Design, Extra-functional Requirements and Real-time Reliability*. Dissertation, Technical University of Munich, Mediatum, https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bvb:91-diss-20250709-1776770-0-4, 2025.

[18] B. Vogel-Heuser and D. Hess, *Muster für modulare Software in der Automatisierungstechnik: ein Handbuch*. 1st ed. Vulkan Verlag, 2025.

4.3 Patente (angemeldete und erteilte)

Nicht zutreffend.

4.4 Sonstige zitierte Literatur

[a] A. Wannagat and B. Vogel-Heuser, "Agent oriented software-development for networked embedded systems with real time and dependability requirements in the domain of automation," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 4144–4149, 2008.

[b] A. Köcher, A. Belyaev, J. Hermann, J. Bock, K. Meixner, M. Volkmann, M. Winter, P. Zimmermann, S. Grimm, and C. Diedrich, "A reference model for common understanding of capabilities and skills in manufacturing," *at - Automatisierungstechnik*, vol. 71, no. 2, pp. 94–104, 2023.

[c] H. Seyed Alinezhad, M. H. Roohi, and T. Chen, "A review of alarm root cause analysis in process industries: Common methods, recent research status and challenges," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 188, pp. 846–860, 2022.

[d] F.-T. Cheng, *Intelligent Factory Automation (iFA) System Platform* (Wiley Online Books), 2021.