

doi.org/10.37544/1436-4980-2026-03-6
Datum der Einreichung: 18.11.2025
Datum der Annahme: 08.01.2026
Datum der Veröffentlichung: 07.04.2026

Entscheidungsunterstützung in der Produktionssteuerung mittels digitaler Zwillinge

Verwaltungsschalengestützte Produktionssteuerung

F. Meister, L. Summer, J. Schilp

ZUSAMMENFASSUNG Mit der Digitalisierung der Industrie steigt das Datenvolumen durch wachsende Vernetzung deutlich. Für eine effiziente Nutzung sind standardisierte Datenstrukturen und Interoperabilität erforderlich. Diese Arbeit nutzt Verwaltungsschalen und zeigt deren Aufbau und Integration in Plant Simulation. Die entwickelte Architektur verknüpft digitale Abbilder der Produktionsressourcen, um sie gezielt in Planungsprozesse einzubinden und simulationsbasierte Entscheidungen zu ermöglichen.

STICHWÖRTER

PPS (Produktionsplanung/ und -steuerung),
Simulation, Industrie 4.0

Asset administration shell-based production control – decision support in production control using digital twins

ABSTRACT With the digitization of industry, the volume of data is increasing significantly due to growing connectivity. Standardized data structures and interoperability are required for efficient use. This work uses administration shells and demonstrates their structure and integration in Plant Simulation. The developed architecture links digital representations of production resources in order to integrate them into planning processes and enable simulation-based decisions.

1 Einleitung

Das produzierende Gewerbe in Deutschland steht im Zuge der Transformation hin zur Industrie 4.0 vor umfassenden Herausforderungen. Eine Befragung des Forschungsinstituts für Rationalisierung (FIR) an der RWTH Aachen unter kleinen und mittleren Unternehmen zeigt, dass die Umsetzung zentraler Industrie-4.0-Konzepte in der Praxis oft an drei wesentlichen Punkten scheitert: Erstens werden Rückmeldedaten aus der Produktion nur selten systematisch ausgewertet und gewinnbringend genutzt. Zweitens bleibt die Produktionssteuerung trotz fortschreitender Digitalisierung vielfach manuell und aufwendig. Drittens mangelt es vielen Unternehmen an Kompetenzen in der Datenanalyse und der Integration von Datenanalysen in die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) [1].

Gleichzeitig steigt der Druck auf die Industrie durch den globalen Preiswettbewerb sowie veränderte Kundenbedürfnisse wie kürzere Produktlebenszyklen und eine zunehmende Individualisierung der Produkte. Vor diesem Hintergrund wird die Entwicklung hin zu flexiblen, datenbasierten und effizient gesteuerten Produktionssystemen zunehmend zur Voraussetzung für die Zukunftsfähigkeit industrieller Betriebe [1, 2].

Um den Weg zur Zukunftsfähigkeit industrieller Betriebe zu ebnet, adressiert diese Arbeit das Job Shop Scheduling als ein gängiges Optimierungsproblem im Kontext der PPS, bei welchem nach Auftragseingang die optimale Reihenfolge zur Produktbearbeitung ermittelt werden muss [3]. Die zentrale Forschungsfrage lautet, inwieweit eine auf Verwaltungsschalen basierende Archi-

tektur als Grundlage für eine simulationsgestützte, automatisierte PPS dienen und so zur Lösung dieses Problems beitragen kann.

Die Verwaltungsschale schafft als digitales Abbild physischer Produktionsressourcen eine standardisierte Schnittstelle zur Datenerfassung und -verarbeitung. In dieser Arbeit wird in Kombination mit der Materialfluss-Simulationssoftware „Plant Simulation“ auf dieser Basis ein digitaler Zwilling für die Produktion realisiert, der durch Optimierung von Produktionsstrategien die PPS unterstützt. Die mittels Simulation ermittelten Ergebnisse werden über Verwaltungsschalen als Stellgrößen an die realen Produktionsressourcen zurückgespielt und führen zu direkten Anpassungen von Parametern, Reihenfolgen und Ressourcenbelegungen. Damit greift der digitale Zwilling aktiv in die Produktionssteuerung ein.

Der Aufbau des Beitrags ist wie folgt: Kapitel 2 erläutert die theoretischen und technischen Grundlagen. Kapitel 3 beschreibt die entwickelte Systemarchitektur. Die Implementierung wird in Kapitel 4 dargestellt. Kapitel 5 evaluiert die Systemarchitektur, ehe in Kapitel 6 nach einer Zusammenfassung weiterführende Potenziale und Perspektiven für Forschung und industrielle Anwendung dargestellt werden.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Als Bindeglied zwischen physischen Produktionsressourcen und digitalen Informationssystemen etabliert sich die Verwaltungsschale zunehmend als Schlüsseltechnologie. Sie schafft die Grundlage für durchgängige Datenflüsse, intelligente Steuerungssysteme und eine nahtlose Integration in Industrie-4.0-Architek-

turen. Sie bildet das digitale Abbild einer physischen oder logischen Entität im Produktionsumfeld ab und umfasst sämtliche zugehörigen Informationen, Funktionen und Dienste [4].

Vor allem bei der Erfassung, Verarbeitung und Bereitstellung von Produktionsdaten bietet die Verwaltungsschale entscheidende Vorteile: Ihr standardisierter Aufbau erlaubt eine durchgängige und einheitliche Modellierung sämtlicher Produktionsressourcen. Durch die Verwendung etablierter Kommunikationsstandards gewährleistet sie eine hohe Interoperabilität und reduziert medienbruchbedingte Ineffizienzen. Dafür sind verschiedene Kommunikationsstandards definiert. Das Paradigma Representational State Transfer (REST) nimmt dabei eine zentrale Rolle ein und wird typischerweise über das Hypertext Transfer Protocol (HTTP) umgesetzt. Ergänzend kommen Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) sowie die Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) zum Einsatz. Die verwendbaren Datenformate und Schnittstellen sind durch die Industrial Digital Twin Association (IDTA) festgelegt [5].

Die IDTA definiert auch die Struktur der Verwaltungsschale. Jede Verwaltungsschale besteht aus einem Header, der zur Identifikation des Objekts dient, und einem Body, in dem die Submodelle organisiert sind. Submodelle beschreiben jeweils einen Teilaspekt der repräsentierten Entität, etwa technische Informationen, Betriebszustände oder Funktionsmerkmale. Die Gesamtheit dieser Submodelle bildet eine lückenlose digitale Abbildung [6–8].

Verwaltungsschalen lassen sich grundsätzlich in Typen und Instanzen unterscheiden. Während ein Typ eine übergeordnete Produktfamilie beschreibt, repräsentiert eine Instanz ein konkretes, individuelles Objekt. Eine weitere Differenzierung erfolgt anhand des Interaktionsgrads mit Softwaresystemen. Typ 1, die passive Verwaltungsschale, dient als statischer Datencontainer, dessen Inhalte unveränderlich sind und ausschließlich zur Informationsbereitstellung verwendet werden. Bei Typ 2, der reaktiven Verwaltungsschale, sind die enthaltenen Informationen hingegen dynamisch und können durch externe Systeme aktualisiert werden. Die aktive Verwaltungsschale (Typ 3) geht über die reine Datenbereitstellung hinaus: Sie verfügt über eigene Entscheidungslogiken und ist in der Lage, autonom auf Zustandsänderungen zu reagieren. Damit bildet sie die technologische Grundlage für eine sich selbst organisierende Produktion [9].

Mehrere aktuelle Forschungsarbeiten widmen sich der praktischen Umsetzung der Verwaltungsschale in industriellen Szenarien, wobei bislang nur wenige Umsetzungsprojekte existieren. *Islam et al.* [10] zeigen eine verwaltungsschalenbasierte Instandhaltungsarchitektur, in der Maschinen und ein Manufacturing Execution System (MES) Informationen über Verwaltungsschalen austauschen, um Wartungsprozesse datenbasiert zu optimieren. *Grunau et al.* [11] demonstrieren eine auftragsgesteuerte Produktion, bei der Produkt- und Anlagen-Verwaltungsschalen selbstständig über Bearbeitungsreihenfolgen verhandeln und Entscheidungen koordinieren. *Sakurada et al.* [12] kombinieren Verwaltungsschalen mit Multi-Agenten-Systemen, um autonome Verhandlungen zwischen Produktionsressourcen zu ermöglichen.

Die Arbeiten zeigen die Eignung der Verwaltungsschale als interoperables Bindeglied zwischen realer und digitaler Produktion, verdeutlichen aber zugleich, dass sich die industrielle Umsetzung noch in einer frühen Phase befindet und der breite Praxiseinsatz bislang aussteht. Dies zeigt sich vor allem daran, dass die untersuchten Ansätze vorwiegend in theoretischen

Forschungsumgebungen umgesetzt wurden, häufig auf einzelne Anwendungsfälle wie Instandhaltung oder Auftragssteuerung beschränkt bleiben und bisher keine durchgängige Integration in reale Produktionssysteme erreicht haben.

Weiterhin existieren zusätzliche technologische Ansätze zur Abbildung von Produktions- und Prozessdaten, wie der Process Data Twin (PDT). Dieser verfolgt einen datengesteuerten, prozessorientierten Ansatz. In der Studie von *Leinenbach et al.* [13] wird der PDT zur Prozessüberwachung eines Plasmacutters eingesetzt, indem der Betrieb des Cutters und die Abhängigkeiten zum zugehörigen Filtersystem automatisiert in Echtzeit überprüft werden, sodass beide Anlagen während des Schneidens die erforderlichen Zustände einhalten.

Im Gegensatz zu bestehenden Arbeiten, die sich überwiegend auf die Umsetzung einzelner Verwaltungsschalen oder Teilaspekte der Produktion konzentrieren, verfolgt der vorliegende Beitrag einen ganzheitlich-systemischen Ansatz. Durch die Abbildung der gesamten Produktionsstruktur mittels Verwaltungsschalen werden sämtliche relevanten Entitäten digital vernetzt und in eine gemeinsame Architektur integriert. Diese Architektur ist modular aufgebaut und darauf ausgelegt, als Grundlage für weitere Implementierungen und Skalierungen zu dienen. Der Ansatz wird exemplarisch in der Lernfabrik des Fraunhofer IGCV praktisch umgesetzt, um die Übertragbarkeit auf reale Produktionsumgebungen zu prüfen.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird im folgenden Kapitel eine Systemarchitektur entwickelt, welche die theoretischen Konzepte der Verwaltungsschale in eine praktische Umsetzung überführt.

3 Systemarchitektur zur datengestützten Produktionssteuerung

Die durchgängige Erfassung und Strukturierung von Produktionsdaten ist in der Praxis eine zentrale Herausforderung, damit diese in der PPS nutzbar gemacht werden können. Zur Bewältigung dieser Herausforderung wird in einem methodischen Vorgehen eine Systemarchitektur entwickelt. Es werden die Rollen von unterschiedlichen Produktionsressourcen identifiziert und darauf aufbauend eine konsistente Verwaltungsschalen-Struktur definiert (Abschnitt 3.1). Auf dieser Basis lassen sich Anwendungsszenarien für Verwaltungsschalen in der PPS ableiten (Abschnitt 3.2), wie etwa die Realisierung einer automatisierten Produktionssteuerung in Verbindung mit einem Simulationsmodell.

3.1 Entwicklung der Systemarchitektur auf Basis der Verwaltungsschale

Die Entwicklung basiert auf einem praxisnahen Anwendungsfall einer manuellen Montage in einer Lernfabrik des Fraunhofer IGCV: Mehrere Fahrzeugvarianten durchlaufen je nach Produktkonfiguration unterschiedliche Produktionsrouten über fünf Arbeitsstationen, die jeweils spezifische Arbeitsvorgänge der Fahrzeugmontage abdecken. Dabei werden die Stationen Fahrstellmontage, Motorenbau, Fahrwerksmontage, Elektrik und Karosseriemontage durchlaufen. Für die Architekturerstellung wird zunächst das Szenario der manuellen Montage analysiert. In der Lernfabrik koordiniert eine Arbeitskraft in der Rolle des Meisters zentral die Auftragsfreigabe, das Engpassmanagement

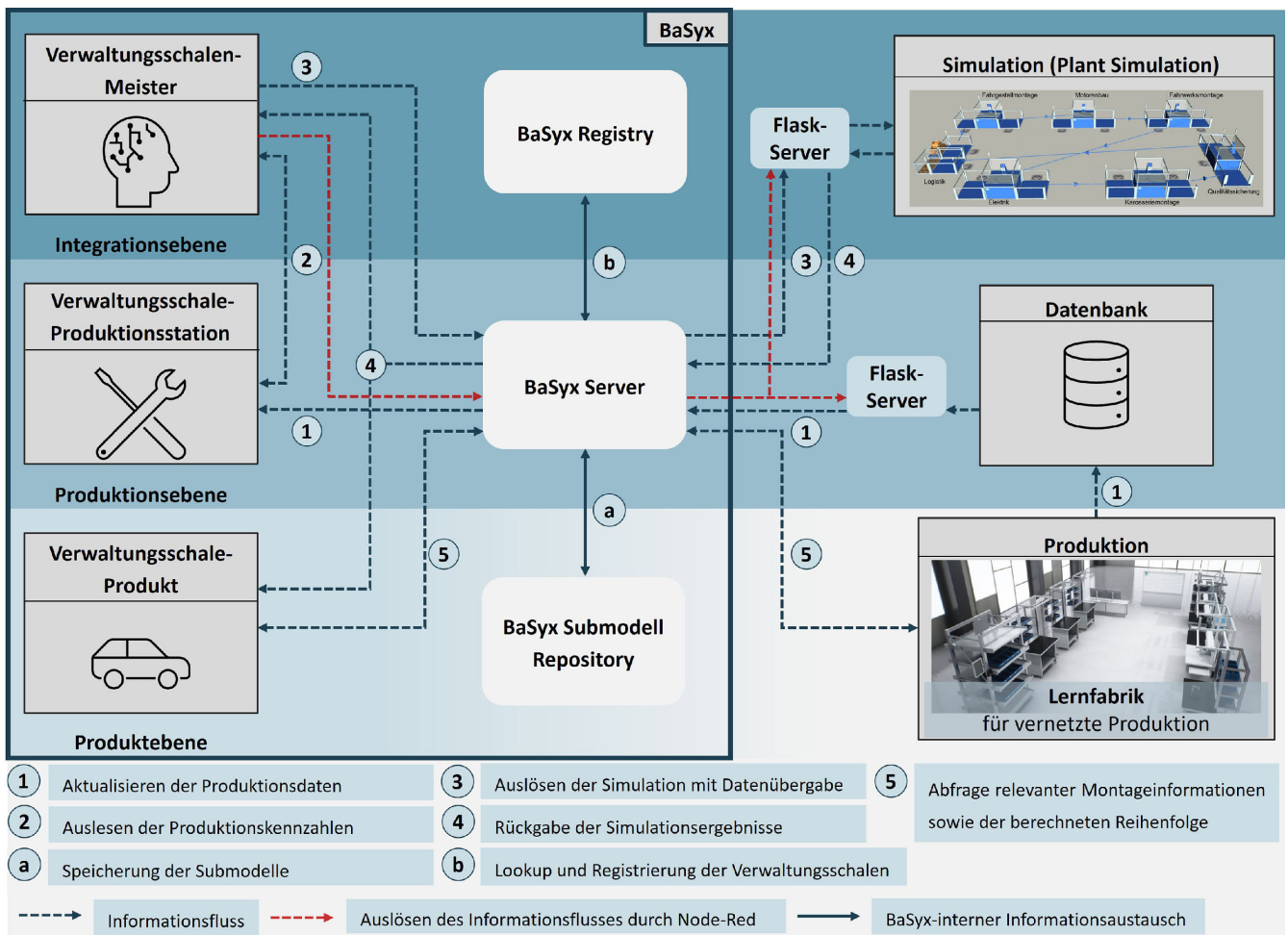


Bild 1 Ebenenstruktur der Verwaltungsschalen. Grafik: Fraunhofer IGCV

und die Reihenfolgebildung. Die Logistik zwischen den Stationen übernimmt eine weitere Arbeitskraft.

Darauf aufbauend wird eine hierarchische Verwaltungsschalen-Architektur entwickelt, welche jede Entität über eine Verwaltungsschale digital abbildet und drei Hierarchieebenen zuordnet: Produktebene, Produktionsebene und Integrationsebene.

Bild 1 veranschaulicht das Architekturkonzept und darin exemplarisch die drei Verwaltungsschalen-Ebenen.

Das Architekturkonzept weist jeder dieser Ebenen spezifische Handlungsfreiheiten und Informationskategorien zu. Die funktionale Trennung der Ebenen gewährleistet, dass Steuerungs- und Informationsflüsse eindeutig zugeordnet sind: Die Integrationsschicht initiiert übergeordnete Steuerungsprozesse, während die unteren Ebenen ausschließlich der Datenerfassung und Zustandsabbildung dienen.

- **Produktebene:** Das methodische Vorgehen definiert die Produktebene zur Abbildung der Fahrzeugvarianten. Das Konzept sieht vor, jede Produkt-Verwaltungsschale als „Single Source of Truth“ zu konzipieren, welche sämtliche fertigungsrelevanten Informationen einschließlich Produktionsreihenfolge und notwendiger Arbeitsschritte zentral und konsistent vorhält. Dabei wird jedes individuelle Produkt durch eine Verwaltungsschale abgebildet. Die Architektur implementiert diese als Typ-2-Verwaltungsschale, wodurch Informationsbereitstellung ohne eigenständige Entscheidungsfindung realisiert wird. Dieses

Designprinzip verhindert, dass lokale Optimierungen die globale Produktionsplanung beeinträchtigen, und gewährleistet die Verfügbarkeit aller fertigungsnotwendigen Informationen an jeder Station, gekennzeichnet in Bild 1 durch den Informationsfluss mit der Nummer 5.

- **Produktionsebene:** Das Architekturkonzept ordnet jeder Produktionsstation eine eigene Verwaltungsschale zu, die technische Kennzahlen, Fähigkeiten und betriebsbegleitend erfasste Kennwerte wie Bearbeitungs- oder Wartezeiten speichert. Die Umsetzung erfolgt ebenfalls als Typ-2-Verwaltungsschale, wodurch ausschließlich Datensammlung und -bereitstellung ohne eigenständige Steuerungsentscheidungen realisiert werden. Auch hier wird jede Station innerhalb der Produktion durch eine eigene Verwaltungsschale dargestellt.
- **Integrationsebene:** Das Konzept sieht eine zentrale Meister-Verwaltungsschale vor, die als zentrale Steuerungs- und Entscheidungsebene fungiert und den gesamten Informationsfluss zwischen Produktion, Structured-Query-Language (SQL)-Datenbank und der Materialflusssimulation Plant Simulation koordiniert. Im Unterschied zu den untergeordneten Ebenen wird diese als Typ-3-Verwaltungsschale konzipiert, da sie aktiv Steuerungs- und Optimierungsprozesse anstoßen muss.

Das Architekturkonzept erweitert die Verwaltungsschalen-Struktur um zwei zentrale Komponenten: eine Datenbank und das Simulationswerkzeug Plant Simulation. Plant Simulation wird als

ereignisdiskrete Simulationssoftware zur realitätsgetreuen Modellierung und Analyse komplexer Fertigungsabläufe eingesetzt [14].

Die Datenbankintegration verfolgt zwei konzeptionelle Ziele: Erstens die Speicherung umfangreicher Rohdaten und historischer Zeitreihen, zweitens deren Vorverarbeitung und Bereitstellung in aggregierter Form. Da Verwaltungsschalen primär den aktuellen Zustand über aussagekräftige Key Performance Indicators (KPIs) kompakt und standardisiert bereitstellen sollen, entlastet die Datenbank diese von Massendaten und stellt nur steuerungsrelevante Informationen zur Verfügung [15, 16]. Die Übergabe der KPIs in die Verwaltungsschalen wird durch Informationsfluss 1 in Bild 1 dargestellt. Die Quelle der Informationen liegt innerhalb der Produktion. Nach Aggregation innerhalb der Datenbank erfolgt die Aufarbeitung in KPIs und anschließend die zyklische Aktualisierung in die Verwaltungsschalen auf Produktionsebene.

Die Systemarchitektur implementiert standardisierte REST-Schnittstellen zur Integration von Datenbank und Simulationskomponente. Dieses Schnittstellenkonzept gewährleistet eine lose Kopplung der Systemkomponenten und ermöglicht den standardisierten Datenabruf und die Ergebnisrückgabe. Die technischen Details zur Schnittstellenimplementierung werden in Kapitel 4 beschrieben. Die Architektur stellt damit einen durchgängigen Informationsfluss zwischen realer Produktion, Datenbank, Verwaltungsschalen und Simulation sicher. Sie ist modular aufgebaut, nutzt standardisierte REST-Schnittstellen und erlaubt somit eine flexible Erweiterung um weitere Datenquellen, Optimierungsstrategien oder Simulationstools. Durch die ereignisbasierte Auslösung der Optimierungsrechnung wird zudem das Datenübertragungsvolumen minimiert, um Systemressourcen im Hinblick auf zukünftige Erweiterungen zu schonen.

Zur Umsetzung der Systemarchitektur wird die Open-Source-Plattform „Eclipse BaSyx“ als zentrale Middleware eingesetzt. Sie stellt die standardkonforme Laufzeitumgebung für alle Verwaltungsschalen bereit und ermöglicht deren Integration in eine verteilte Systemlandschaft. BaSyx übernimmt dabei die Rolle der kommunikativen Kernschicht zwischen den Verwaltungsschalen, der Datenbank und der Simulation.

Die Architektur von BaSyx umfasst mehrere zentrale Dienste: Der Verwaltungsschalen-Server hostet und verwaltet die digitalen Repräsentationen der physischen Entitäten und macht sie über standardisierte REST-Schnittstellen adressierbar. Aus diesem Grund laufen alle Kommunikationswege über den BaSyx-Server. Die Verwaltungsschalen-Registry dient der eindeutigen Identifikation und Auffindbarkeit aller Verwaltungsschalen innerhalb des Netzwerks, während das Submodel Repository die Verwaltung und Speicherung der einzelnen Submodelle ermöglicht [17].

Aufbauend auf der durch BaSyx bereitgestellten Middleware wird die prozessuale Steuerung der Systemarchitektur über „Node-RED“ realisiert. Node-RED dient hierbei als Orchestrierungstool, das die Kommunikation zwischen den Verwaltungsschalen, der Datenbank und der Simulationsumgebung steuert. Über ereignisbasierte Flows werden Datenabfragen, Aktualisierungen und Simulationsaufrufe automatisiert ausgelöst. Zur Umsetzung dieser Kommunikationslogik wird Python als Programmiersprache eingesetzt. Die in Node-RED eingebetteten Python-Skripte erlauben den Aufruf von REST-Endpunkten, die Übergabe strukturierter JSON-Daten sowie die Ansteuerung der im Flask-Server realisierten Schnittstellen. Damit fungiert Node-RED als verbindendes Element zwischen den architekturellen

Komponenten und gewährleistet einen konsistenten, standardisierten Informationsfluss im Gesamtsystem.

3.2 Anwendungsszenarien in der PPS

Der Beitrag adressiert zwei Anwendungsszenarien in der Lernfabrik: Im ersten Anwendungsszenario werden die in der Produktion anfallenden Betriebsdaten kontinuierlich in die entsprechenden Verwaltungsschalen der Produktionsressourcen übertragen. Auf diese Weise entsteht eine stets aktuelle Abbildung des Bearbeitungsstatus, der Betriebszustände und der relevanten Produktionskennzahlen. Damit kann die PPS den Auftragsfortschritt nahezu in Echtzeit verfolgen und Abweichungen frühzeitig erkennen.

Im zweiten Anwendungsszenario erfolgen automatisierte Anpassungen der Produktionssteuerung auf Basis der Verwaltungsschalen-Daten. Bei neuen oder geänderten Aufträgen wird automatisch die optimale Produktionsreihenfolge ermittelt: Aktuelle Produktionsdaten werden in das Simulationsmodell überführt und dort zur modellbasierten Optimierung der Reihenfolge verwendet.

Dazu werden im Simulationsmodell drei gängige Reihenfolgestrategien umgesetzt: First In First Out (FIFO), Shortest Processing Time (SPT) und Longest Processing Time (LPT). Bei FIFO erfolgt die Bearbeitung in der Reihenfolge des Auftragseingangs, unabhängig von Produktvariante oder Bearbeitungsaufwand. SPT priorisiert jeweils den Auftrag, dessen nächster Bearbeitungsschritt die geringste Bearbeitungszeit aufweist. Umgekehrt wählt LPT den Auftrag aus, dessen nächster Bearbeitungsschritt die längste Bearbeitungszeit erfordert [18]. Auf diese Weise wird die Entscheidungslogik an der jeweiligen Station lokal angewendet. Die Simulationsergebnisse werden über die Verwaltungsschalen als Stellgrößen an die Produktionsressourcen zurückgeschrieben und führen zu direkten Anpassungen von Parametern, Reihenfolgen und Ressourcenbelegungen. So wird der Regelkreis zwischen Produktion und Simulationsmodell geschlossen.

4 Technische Umsetzung

Um die zuvor beschriebenen Anwendungsszenarien für die manuelle Montage der Lernfabrik zu implementieren, sind bei der technischen Umsetzung zwei Anforderungen an die Systemarchitektur zu erfüllen. Erstens muss eine einheitliche Datenbasis geschaffen werden, die alle relevanten Produktionsinformationen strukturiert erfasst, kategorisiert und den jeweiligen Verwaltungsschalen zuordnet (Abschnitt 4.1). Zweitens ist eine standardisierte Kommunikationsstruktur erforderlich, die einen konsistenten Datenaustausch zwischen den Systemkomponenten Verwaltungsschalen, der Datenbank und dem Simulationsmodell ermöglicht (Abschnitt 4.2).

4.1 Umsetzung der Verwaltungsschalen

Bei der Implementierung erhalten die Verwaltungsschalen die notwendigen Submodelle, Submodel Collections (SMC) und Properties, um sowohl produktionsnahe Betriebsdaten als auch die Ergebnisse der Simulation strukturiert abzubilden. Zur Erstellung der Verwaltungsschalen und ihrer Teilmodelle wird der „AASX Package Explorer“ verwendet, ein von der Eclipse Foundation bereitgestelltes Open Source Tool, das die Erstellung, Verwaltung

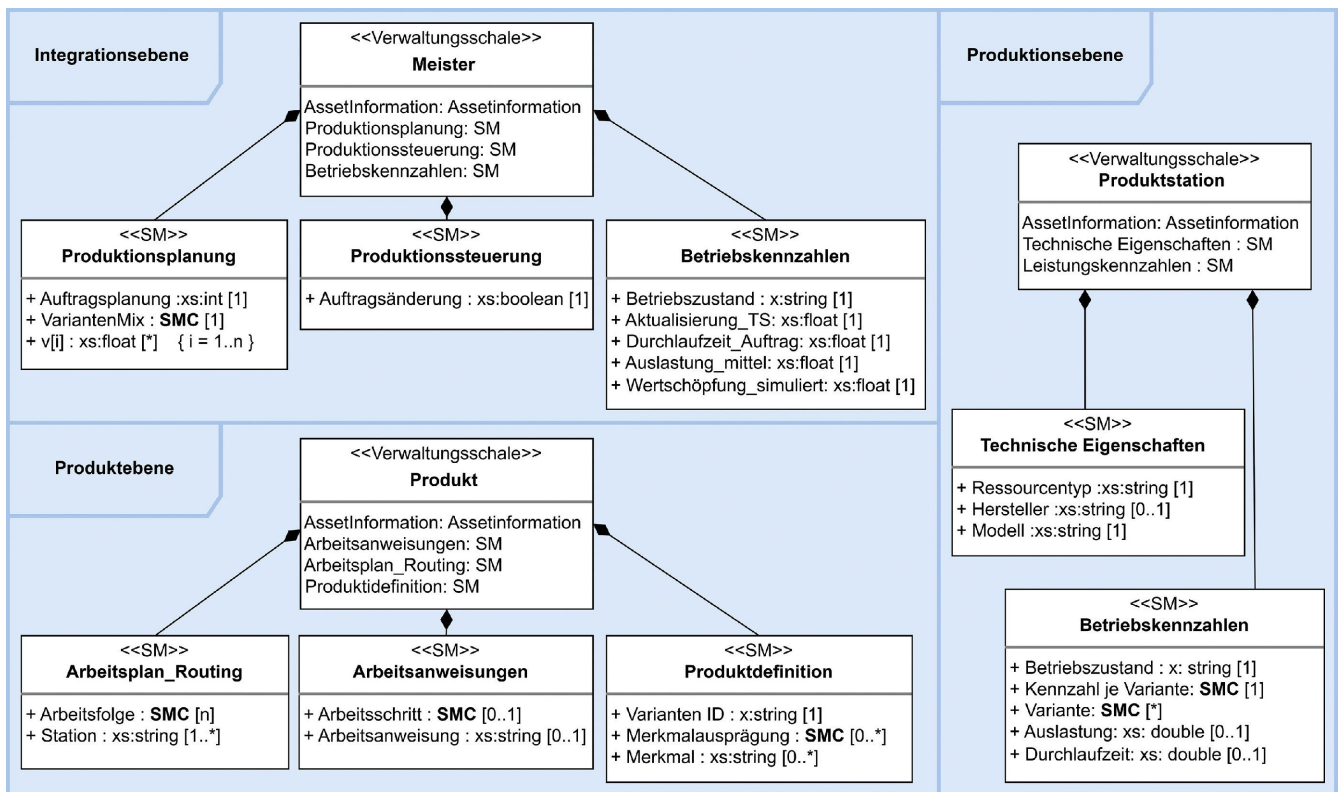


Bild 2 Aufbau der Verwaltungsschalen als UML(Unified Modeling Language)-Diagramm. Grafik: Fraunhofer IGCV

und Validierung von Verwaltungsschalen gemäß dem IDTA-Standard ermöglicht [19].

Zur funktionalen Abbildung ihrer Aufgaben, gemäß den in Kapitel 3 vorgestellten Ebenen, umfasst die Verwaltungsschale des Meisters drei logisch getrennte Submodelle mit klar definierten Zuständigkeiten. Diese betreffen die PPS sowie das Bereitstellen von organisatorischen Betriebskennzahlen.

Der Aufbau der Verwaltungsschalen ist in Bild 2 als Unified Modeling Language (UML)-Diagramm dargestellt und wird nachfolgend näher beschrieben.

Das Submodell „Produktionsplanung“ enthält die aktuellen Produktionsaufträge der betreffenden Planungsdaten. Enthalten sind die Bestellmenge an Fahrzeugen sowie deren Variantenverteilung; diese wird in einzelne Properties innerhalb der SMC gegliedert.

Im Submodell „Produktionssteuerung“ werden laufende Änderungen sowie die Auftragsfreigabe abgebildet. Basierend auf den hier hinterlegten Kennzahlen löst das System entsprechende Steuerungsaktionen aus. Wenn sich beispielsweise die Auftragszusammensetzung ändert, initiiert die Steuerung automatisch eine Neubewertung der Produktionsreihenfolge, um den Produktionsfluss anzupassen.

Das Submodell „Betriebskennzahlen“ enthält berechnete Leistungsindikatoren des aktuellen Auftrags, wie die prognostizierte Gesamtbearbeitungszeit, Auslastung und Wertschöpfung. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Bewertung der organisatorischen Tätigkeit des Meisters.

Die Aufteilung der Submodelle des Meisters folgt dabei dem Prinzip einer funktional entkoppelten und modular erweiterbaren Architektur, die eine klare Trennung zwischen Planungs-, Steuerungs- und Bewertungsdaten gewährleistet. Dies ermöglicht eine

einfache Erweiterung der Meister-Verwaltungsschale für weitere organisatorische Fragestellungen innerhalb der PPS.

Während die Integrationsschicht die Planungs- und Steuerungslogik bündelt, bildet die Produktionsebene die realen Produktionsressourcen ab. Hier werden fünf Verwaltungsschalen implementiert, die jeweils einer Produktionsstation entsprechen. Alle Stationen folgen einer einheitlichen Struktur, bestehend aus den Submodellen „Technische Eigenschaften“ und „Betriebskennzahlen“.

Mit dem Submodell Technische Eigenschaften wird die Forderung der IDTA nach eindeutiger Identifizierbarkeit von Entitäten erfüllt [20]. Dementsprechend werden hier Informationen über die jeweilige Station abgelegt. Dabei handelt es sich um die Fähigkeiten sowie den Hersteller und das jeweilige Modell der gesamten abgebildeten Station. Das Submodell dient der strukturierten Beschreibung der technischen Fähigkeiten und Identifikationsmerkmale der jeweiligen Produktionsressource.

Das Submodell der Betriebskennzahlen bildet den aktuellen Zustand der Station ab. Dabei handelt es sich um den aktuellen Betriebszustand, beispielsweise arbeitend, wartend oder störungsfrei. Außerdem werden Betriebskennzahlen nach Produktvariante abgelegt. Dabei werden die Produktvarianten individuell als Properties innerhalb der SMC angelegt. Die Gesamtheit der auf Produktionsebene angelegten Submodelle gibt folglich den Ist-Zustand der Produktion wieder. Werden Steuerungseingriffe durch den Meister initiiert, dienen die KPIs der genannten Verwaltungsschalen als Eingangsparameter für die simulationsgestützte Bewertung in der Integrationsschicht.

Auf der Produktebene werden gemäß den Fahrzeugvarianten ebenso viele Verwaltungsschalen erstellt. Diese sind als Typ-Verwaltungsschalen ausgeführt und werden im Produktionsverlauf

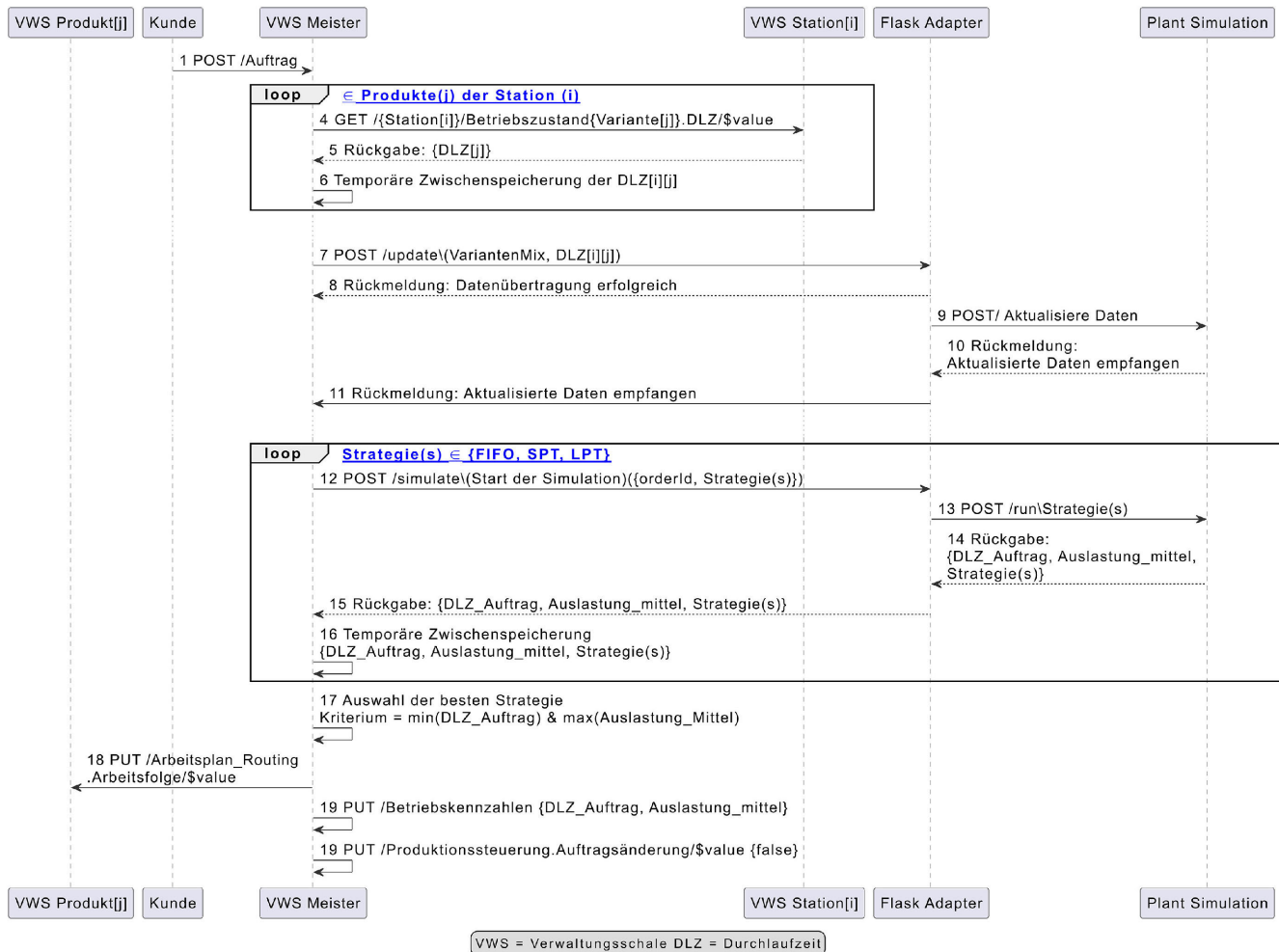


Bild 3 UML-Sequenzdiagramm zur Reihenfolgeberechnung. Grafik: Fraunhofer IGCV

auf Basis ihrer Typdefinition instanziiert, um die individuellen Produktaufträge abzubilden. Der Aufbau der Produkt-Verwaltungsschalen ist damit unabhängig von der jeweiligen Produktvariante, wodurch sich neue Varianten mit geringem Anpassungsaufwand ergänzen lassen.

Die im Submodell „Produktdefinition“ enthaltenen Informationen ermöglichen eine klare Identifikation der Variante. Hier enthalten sind die eindeutige Identifikationsnummer (ID) sowie die Konfiguration des Produkts, gegliedert nach den Merkmalen innerhalb eines SMC.

Die entsprechenden Arbeitsanweisungen zur Umsetzung der gewünschten Konfiguration werden im Submodell „Arbeitsanweisungen“ gegliedert. Die Werker der Produktionsstationen erhalten ihre Informationen aus diesem Submodell. Nach abgeschlossener Bearbeitung wird die Folgestation über das Submodell „Arbeitsplan_Routing“ an die Logistik bereitgestellt.

Der modulare Aufbau der Produkt-Verwaltungsschale erlaubt eine flexible Anpassung des Produktionsprogramms, die Individualisierung einzelner Produkte sowie eine aufwandsarme Erweiterung oder Reduktion des Variantenportfolios. Durch die einheitliche Struktur aller Produkt-Verwaltungsschalen wird zudem eine eindeutige und widerspruchsfreie Informationsbereitstellung sichergestellt. Das zugrunde liegende Konzept der Single Source of Truth gewährleistet, dass alle produktionsrelevanten

Informationen konsistent und für alle beteiligten Systeme zugänglich vorliegen.

4.2 Umsetzung der Anwendungsszenarien

Um das erste Anwendungsszenario umzusetzen, werden die Verwaltungsschalen der Produktionsstationen fortlaufend mit aktuellen Produktionsdaten versorgt. Diese werden direkt an den Stationen erfasst, in einer Datenbank abgelegt und anschließend vorverarbeitet. Die Übertragung erfolgt zyklisch über den in Node-RED realisierten Flow, der die Daten in definierten Intervallen abfragt und den Verwaltungsschalen zuordnet. Hierzu wird auf dem Rechnersystem der Datenbank ein Flask-Server implementiert. Dieser enthält einen REST-Endpunkt, welcher nach einem GET-Befehl die vordefinierten Daten aus einer SQL-Datenbank ausliest und diese im JSON-Format an die Verwaltungsschalen der Produktionsstationen zurücksendet. Dabei wird jeder Station ein Zeitwert für die Bearbeitung einer jeweiligen Produktvariante zugeordnet. Nach erfolgreicher Übertragung der Daten wird der Zeitpunkt der Aktualisierung in der Verwaltungsschale des Meisters im Submodell Betriebskennzahlen abgelegt. Dieses Vorgehen stellt zum einen sicher, dass die Daten innerhalb der Verwaltungsschalen zu jedem Zeitpunkt die aktuelle Situation der Produktion widerspiegeln, weiterhin erhöht die Aktualität der

Daten die Aussagekraft der im zweiten Anwendungsfall folgenden Simulation.

Das zweite Anwendungsszenario, in welchem neue Fertigungsaufträge oder Änderungen bestehender Aufträge automatisch eine Optimierung der Produktionsreihenfolge anstoßen, wird durch die Verknüpfung der BaSyx-Umgebung mit Plant Simulation über einen zweiten Flask-Server ermöglicht. Der nachfolgend beschriebene Ablauf der Reihenfolge Neuberechnung ist in **Bild 3** in Form eines UML-Sequenzdiagramms dargestellt.

Sobald die Notwendigkeit einer Umplanung aufgrund einer Auftragsänderung innerhalb des Submodells Produktionssteuerung des Meisters erkannt wird, wird der über Node-RED organisierter Flow ausgelöst. Dabei werden im ersten Schritt die aktuellen Produktionsdaten aus den Verwaltungsschalen der Produktionsstationen aufgerufen, aggregiert und dem Simulationsrechner übergeben. Weiterhin wird die neue Auftragszusammensetzung übermittelt. Durch einen Post-Befehl an den Flask-Server wird die Aktualisierung der Daten im Simulationsmodell angestoßen. Sind alle Daten übergeben, wird über einen zweiten Post-Befehl die Simulation gestartet. Diese beginnt mit der Berechnung der ersten Strategie. Ist die erste Strategie berechnet, werden die erhaltenen Daten aus Plant Simulation exportiert und die nächste Simulation gestartet. Dieser Vorgang erfolgt so lange, bis alle Strategien berechnet sind. Nach Abschluss aller Simulationsdurchläufe werden die Ergebnisse verglichen. Dabei dienen die Kennzahlen der mittleren Auslastung sowie der gesamten Bearbeitungszeit des jeweiligen Auftrags als Bewertungsgrundlage. Nach Auswahl der besten Strategie werden die Daten zurück an die Verwaltungsschalen übermittelt.

Die übermittelten Ergebnisse bestehen aus der optimalen Stationsreihenfolge pro Produkt, welche direkt in das Submodell `Arbeitsplan_Routing` der jeweiligen Verwaltungsschalen gespeichert wird, sowie aus organisatorischen Daten, wie erwartete Auslastung und errechnete Gesamtzeit des Auftrags. Diese Daten werden in der Verwaltungsschale des Meisters abgelegt und sollen hier die Transparenz des Systems erhöhen sowie einen Soll-Ist-Vergleich ermöglichen. Zeitgleich mit dem Ablegen der neuen Daten wird der Auftragsstatus im Submodell `Auftragsänderung` in der Verwaltungsschale-Meister zurückgesetzt. So wird verhindert, dass sich eine Schleife aus unnötigen Optimierungsmaßnahmen ergibt.

5 Evaluierung

Das entwickelte System erfüllt die in Kapitel 4 definierten Voraussetzungen und bildet die Lernfabrik des Fraunhofer IGCV im digitalen Raum realitätsnah ab. Es stellt eine konsistente Informationsbasis für die PPS bereit: Zentrale Leistungskennzahlen (Durchlaufzeiten, Auslastungsgrade, Bearbeitungskosten) werden zyklisch erfasst und aktualisiert, Live-Daten (wie Störungsmeldungen, Materialbestände) ermöglichen eine zeitnahe Situationsbewertung.

Der gewählte Architekturansatz erweist sich sowohl in der Implementierung als auch im späteren Betrieb als besonders tragfähig. Die Einteilung in Ebenen mit klarer Trennung zwischen Produkt-, Produktions- und Integrationsebene gewährleistet eine robuste und modular erweiterbare Struktur. Fällt eine einzelne Verwaltungsschale oder sogar eine gesamte Ebene aus, bleibt der Fehler auf den betroffenen Bereich beschränkt. Durch die funk-

tionale Trennung der Ebenen bleibt das übrige System uneingeschränkt funktionsfähig.

Das Konzept der Single Source of Truth gewährleistet, dass sämtliche produktionsrelevanten Daten eindeutig und widerspruchsfrei in den Verwaltungsschalen vorliegen. Die Produkt-Verwaltungsschalen liefern alle herstellungsspezifischen Informationen, die Meister-Verwaltungsschale koordiniert organisatorische Daten wie etwa Auftragsbestände und gewählte Reihenfolgestrategien. Damit erfüllt das System die Voraussetzung einer durchgängigen und konsistenten Informationsbereitstellung.

Die automatisierte Planung und Steuerung als zweite Anforderung ist als geschlossener Regelkreis umgesetzt: Aktuelle Produktionsdaten werden in ein Simulationsmodell überführt, Strategien zur Reihenfolgebildung bewertet und die Ergebnisse über die Verwaltungsschalen zurückgeschrieben. Die praktische Erprobung mit verschiedenen Auftragskonstellationen zeigte, dass das System automatisiert die jeweils optimale Bearbeitungsstrategie auswählt. Je nach Zusammensetzung der Aufträge ergaben sich Unterschiede in der gesamten Bearbeitungszeit von bis zu 7 % zwischen den Strategien. Besonders deutlich wirken sich die Effekte auf die Auslastung einzelner Stationen aus, da der Regelkreis Aufträge dynamisch und datenbasiert auf Basis der aktuellen Fertigungssituation verteilt.

Wie die Evaluationen zeigen, kann eine auf Verwaltungsschalen basierende Systemarchitektur als Grundlage für eine simulationsgestützte, automatisierte PPS dienen. Ihr standardisierter Aufbau, die klare Trennung in Submodelle und die Interoperabilität über REST-Schnittstellen ermöglichen eine modulare, erweiterbare und transparente Integration von Produktion, Datenhaltung und Simulation. Verwaltungsschalen fungieren als zentrale Informationsknotenpunkte und verbinden alle Systemkomponenten medienbruchfrei.

Im Verlauf der Implementierung und praktischen Erprobung zeigten sich jedoch auch zentrale Limitationen der Verwaltungsschalen-Technologie, die eine Weiterentwicklung der Standardisierung erfordern. Diese betreffen vor allem die Implementierung von Typ-3-Verwaltungsschalen, die neben der reinen Datenhaltung auch eigene Entscheidungslogiken enthalten und damit autonom auf Zustandsänderungen reagieren. In der praktischen Umsetzung zeigte sich jedoch, dass hierfür aktuell keine einheitlichen Standardmechanismen seitens der IDTA existieren. Die Spezifikationen konzentrieren sich derzeit auf die Datenstruktur und Kommunikationsschnittstellen, nicht jedoch auf standardisierte Konzepte für eingebettete Entscheidungslogiken innerhalb einzelner Verwaltungsschalen.

Aus diesem Grund setzt die in dieser Arbeit entwickelte Meister-Verwaltungsschale ihre Entscheidungslogik nicht intern um, sondern über ein externes Orchestrierungssystem. Node-RED ruft die benötigten Daten aus den Verwaltungsschalen ab, stößt die Simulationsberechnungen an und schreibt die Ergebnisse anschließend zurück in die Verwaltungsschale. Die Meister-Verwaltungsschale fungiert somit als Koordinationsknoten, nicht aber als eigenständig entscheidende Instanz. Diese Vorgehensweise basiert auf der Tatsache, dass für eine direkte Implementierung von Entscheidungslogiken innerhalb der Verwaltungsschalen derzeit weder standardisierte Schnittstellen noch Referenzarchitekturen existieren. Um eine breite industrielle Umsetzung zu ermöglichen, besteht weiterer Standardisierungsbedarf, vor allem in Bezug auf Mechanismen zur Einbettung von Entscheidungslogiken, Event-Handling und Orchestrierung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das System demonstriert eine verwaltungsschalenbasierte, durchgängige Datenintegration und einen umgesetzten geschlossenen Regelkreis zwischen realer Produktion, Verwaltungsschalen und Simulationsmodell. Die Evaluation zeigt eine konsistente Informationsbasis und messbare Verbesserungen (zum Beispiel bis zu 7 % kürzere Bearbeitungszeiten je nach Optimierungsstrategie) sowie eine datenbasierte, situationsabhängige Verteilung von Aufträgen an den Stationen mit kurzer Reaktionszeit. Gleichzeitig werden Grenzen der aktuellen Verwaltungsschalen-Spezifikationen sichtbar.

Perspektivisch lässt sich die Architektur um prädiktive und auf künstlicher Intelligenz (KI) basierende Optimierungsverfahren, zusätzliche Strategien zur Reihenfolgebildung und eine erweiterte Live-Datenverarbeitung ausbauen. Mit neuen Standards zu Entscheidungslogiken, Events und Orchestrierung können Verwaltungsschalen autonome Entscheidungsfähigkeit erlangen und der vorgestellte Ansatz noch besser in Produktionssystemen umgesetzt werden.

LITERATUR

- [1] Fischer, M.; Schröter, M.; Söntgerath, K.: Digital Connected Production, Aachen: FIR e. V. an der RWTH Aachen 2022
- [2] Jäger, J.; Görzig, D.; Paulus-Rohmer, D. et al.: Industrie 4.0 – Chancen und Perspektiven für Unternehmen der Metropolregion Rhein-Neckar. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierungstechnik IPA 2015
- [3] Leusin, M. E.; Frazzon, E. M.; Uriona Maldonado, M. et al.: Solving the Job-Shop Scheduling Problem in the Industry 4.0 Era. *Technologies* 6 (2018) 4, #107
- [4] Bader, S.; Barnstedt, E.; Bedenbender, H. et al.: Details of the Asset Administration Shell: Part 1 – The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 2.0.1), Plattform Industrie 4.0. Stand: 2020. Internet: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V2.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Zugriff am 27.01.2026
- [5] Adolphs, P.; Auer, S.; Bedenbender, H.: The Structure of the Administration Shell: Trilateral Perspectives from France, Italy and Germany. Stand 2018. Internet: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/hm-2018-trilaterale-coop.html. Zugriff am 27.01.2026
- [6] Industrial Digital Twin Association: 01001–3–0. Specification of the Asset Administration Shell. Part 1: Metamodel Schema. Stand: 2023. Internet: [industrialdigitaltwin.org/en/wp-content/uploads/sites/2/2025/06/IDTA_01001-25-01_AAS-Specification_Part1_Metamodel.pdf](https://www.industrialdigitaltwin.org/en/wp-content/uploads/sites/2/2025/06/IDTA_01001-25-01_AAS-Specification_Part1_Metamodel.pdf). Zugriff am 27.01.2026
- [7] Industrial Digital Twin Association e.V.: AAS Submodel Templates. Internet: [industrialdigitaltwin.org/en/content-hub/submodels](https://www.industrialdigitaltwin.org/en/content-hub/submodels). Zugriff am 27.01.2026
- [8] Industrial Digital Twin Association e.V.: 01002–3–0. Specification of the Asset Administration Shell Part 2: Application Programming Interfaces. Stand: 2023. Internet: [industrialdigitaltwin.org/wp-content/uploads/2023/04/IDTA-01002-3-0_SpecificationAssetAdministrationShell_Part2_API.pdf](https://www.industrialdigitaltwin.org/wp-content/uploads/2023/04/IDTA-01002-3-0_SpecificationAssetAdministrationShell_Part2_API.pdf). Zugriff am 27.01.2026
- [9] Bedenbender, H.; Bock, J.; Boss, B. et al.: Verwaltungsschale in der Praxis. Wie definiere ich Teilmodelle, beispielhafte Teilmodelle und Interaktion zwischen Verwaltungsschalen (Version 1.0), Plattform Industrie 4.0. Stand: 2020. Internet: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/2020-verwaltungsschale-in-der-praxis.html. Zugriff am 27.01.2026
- [10] Islam, R.; Wand, A.; Röder, C. et al.: Erfahrungsbericht bei der Umsetzung der VWS Type 3: Interaktionen in einer Maintenance-Anwendung. Magdeburg: Otto von Guericke University Library 2023, <https://dx.doi.org/10.25673/111634>
- [11] Grunau, S.; Redeker, M.; Göllner, D. et al.: The Implementation of Proactive Asset Administration Shells: Evaluation of Possibilities and Realization in an Order Driven Production. In: Jasperneite, J.; Lohweg, V. (Hrsg.): Kommunikation und Bildverarbeitung in der Automation. Heidelberg: Springer 2022, S. 131–144
- [12] Sakurada, L.; La Prieta, F. D.; Leitao, P.: A Methodology for Integrating Asset Administration Shells and Multi-agent Systems. 2023 IEEE 32nd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Helsinki, Finland, 2023, pp. 1–6
- [13] Leinenbach, A.; Wagner, M.; Oettl, F. et al.: The Process Data Twin For Digitized Production. Hannover: publish-Ing 2024
- [14] Siemens PLM Software: Tecnomatix Plant Simulation. Simulate, visualize, analyze and optimize production systems and logistics processes. Internet: www.plm.automation.siemens.com/media/store/en_us/Tecnomatix%20Plant%20Simulation_7541_tcm29-2062.pdf. Zugriff am 27.01.2026
- [15] Rahal, J. R.; Schwarz, A.; Sahelices, B. et al.: The asset administration shell as enabler for predictive maintenance: a review. *Journal of Intelligent Manufacturing* 36 (2025) 1, pp. 19–33
- [16] Bedenbender, H.; Billmann, M.; Eppe, U. et al.: Examples of the Asset Administration Shell for Industrie 4.0 Components – Basic Part. Continuing Development of the Reference Model for Industrie 4.0 Components. Frankfurt am Main: ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V 2017
- [17] The Eclipse Foundation: Eclipse BaSyx – Industry 4.0 Operating System. Internet: eclipse.dev/basysx/. Zugriff am 27.01.2026
- [18] Lödding, H.: Reihenfolgebildung. In: Lödding, H. (Hrsg.): Verfahren der Fertigungssteuerung. Heidelberg: Springer 2016, S. 507–528
- [19] Eclipse Foundation: Eclipse AASX Package Explorer and Server. Internet: projects.eclipse.org/projects/dt.aaspe. Zugriff am 27.01.2026
- [20] Bedenbender, H.; Bader, S.; Billmann, M. et al.: Submodel Templates of the Asset Administration Shell – Generic Frame for Technical Data for Industrial Equipment in Manufacturing (Version 1.1). Stand: 2024. Internet: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Submodel_templates-Asset_Administration_Shell-Technical_Data.html. Zugriff am 27.01.2026

Frederic Meister, M.Sc.
frederic.meister@tum.de

Laurin Summer, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp
Fraunhofer-Institut für Gießerei, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV
Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg
www.igcv.fraunhofer.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)