

A photograph of a modern industrial factory floor. In the foreground, a white robotic arm is visible, partially obscured by a blue geometric overlay. In the background, another robotic arm is visible, and the factory environment is filled with various mechanical components and structures. The image is used as a background for the document cover.

smartFactory^{KL}

Whitepaper SF 10/2025

SmartFactory Referenzarchitektur

Standardisierte Vernetzung von IT und OT



Autoren

Simon Jungbluth, Benjamin Blumhofer, Carsten Harms, Pascal Rübél, Simon Bergweiler,
Prof. Dr. Martin Ruskowski

Impressum

Dieses Dokument ist unter dem Titel „SmartFactory Referenzarchitektur - Standardisierte Vernetzung von IT und OT“ im Oktober 2025 von der **Technologie-Initiative SmartFactory KL e. V.** veröffentlicht und von den hier aufgeführten Autoren verfasst worden. Es wird kostenlos verteilt und ist nicht zum Verkauf bestimmt.

Herausgeber

Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V.
Trippstadter Straße 122
67663 Kaiserslautern

Stand: Oktober 2025

Vorwort

Seit zwei Jahrzehnten steht die SmartFactory^{KL} für Innovation, Zusammenarbeit und technologische Weitsicht im Bereich der industriellen Produktion. In dieser Zeit haben wir gemeinsam mit unseren Partnern zukunftsweisende Konzepte entwickelt, erprobt und in die Praxis überführt.

Im Folgenden präsentieren wir die SmartFactory Referenzarchitektur, welche Unternehmen einen klaren Orientierungsrahmen bietet, um dem steigenden Markt- und Technologiedruck erfolgreich zu begegnen. Sie unterstützt eine konsistente Datenstrategie, ermöglicht die schrittweise Modernisierung bestehender Produktionsumgebungen und schafft durch Offenheit und Skalierbarkeit die Basis für die Integration zukünftiger Schlüsseltechnologien.

Wir danken allen Mitwirkenden und freuen uns auf die kommenden Jahre innovativer Zusammenarbeit.

Inhalt

Einleitung und Motivation.....	1
Die Referenzarchitektur der SmartFactory	2
OT-IT-Konvergenz für smarte Fabriken.....	4
Mehr Wert schaffen durch kontextbezogene Datenvernetzung	4
Smarte Produktionssteuerung durch KI-Agenten	5
Digital Twin-driven Manufacturing in fünf Schritten	6
Anwendungsbeispiele	7
Modularer Aufbau und Umsetzung der Referenzarchitektur: Produktionsinsel_PHUKET	7
Aktive Teilnahme im Manufacturing-X Ökosystem	9
Einheitliche, interoperable Zugriffsmechanismen mit MCP in der Produktion	9
Verwaltungsschale als Enabler für interoperables Wissensmanagement	10
Shared Production	10
Fazit	10
Literaturverzeichnis	11

Einleitung und Motivation

Im Jahr 2022 hat die Task Force Manufacturing-X der Plattform Industrie 4.0 [1] die Notwendigkeit „[...] zur Entwicklung und Aufbau einer dezentral organisierten Datenökonomie für die deutsche und europäische Industrie [...]“ [1] beschrieben. Treiber einer solchen branchenübergreifenden industriepolitischen Initiative sind unter anderem der wachsende Wettbewerbsdruck auf die Industrie (z.B. durch Lieferengpässe oder die Gefahr einer globalen Rezession) und zunehmende regulatorische Anforderungen (z.B. durch die europäische Kommission). Ziele sind dabei die Erhöhung der Resilienz deutscher Industrieunternehmen, um auf Störungen schnell reagieren und Wertschöpfungsnetzwerke neu organisieren zu können, sowie der Erhalt und Ausbau der Wettbewerbsstärke der deutschen Industrie auf dem Weltmarkt. Damit das gelingt, braucht es eine intelligente und vernetzte Industrie. In dieser müssen Daten nahtlos integriert sein und die Unternehmen müssen bereit sein, sie sicher und vertrauensvoll miteinander zu teilen. Dies erfordert die durchgängige Vernetzung der gesamten Wertschöpfungskette aller Akteure. Mit Hinblick auf die von kleinen und mittelständischen Unternehmen geprägte Industrielandschaft in Deutschland entstehen neue Herausforderungen:

- Unternehmen müssen sich in einem von monopolartigen Plattformbetreibern geprägten Markt behaupten,
- die notwendige digitale Transformation erfordert tiefgreifende strukturelle Anpassungen, insbesondere durch die durchgängige Vernetzung und vertikale Integration von Daten von der Fertigungsebene (Shopfloor) bis in die Cloud,
- die auf dem Shopfloor vorherrschenden starren, hardwaregebundenen Steuerungssysteme müssen modernisiert und entkoppelt werden, um die notwendige Flexibilität und Resilienz für schnelle Reaktionen auf Marktveränderungen zu schaffen,
- vor dem Hintergrund des demografischen Wandels und des damit einhergehenden Fachkräftemangels wird der strategische Umgang mit Wissen und Daten immer wichtiger. Unternehmen müssen ihr digitales Wissensfundament sichern

und ausbauen, um künftige Arbeitskräfte effektiv einzuarbeiten und durch intelligente Systeme bei komplexen Aufgaben zu unterstützen [2].

Ausgehend von der Idee einer vernetzten Datenökonomie wurde im Jahr 2024 die Initiative Manufacturing-X von der deutschen Regierung zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands/Europas gestartet [3]. Dies erfordert eine gemeinsame Grundlage für den Datenaustausch. Eine herstellerunabhängige, standardisierte und semantische Struktur der Informationsmodelle für den Austausch maschinenlesbarer und interpretierbarer Daten (1), eine standardisierte Kommunikation für automatisierte Verhandlungen und Datenaustausch (2), sowie eine föderierte und sichere Dateninfrastruktur in Übereinstimmung mit den europäischen Gesetzen (3) sind nun notwendig [4]. Die Vernetzung und Digitalisierung ist dabei ein entscheidender Treiber, um neue Wertschöpfungspotentiale zu erschließen. Hierzu müssen Assets, in unserem Kontext materielle oder immaterielle Gegenstände von Wert für die Produktion [5], herstellunabhängig und interoperabel beschrieben werden, um eine übergreifende Kommunikation der OT und IT zu ermöglichen [6]. Dies wird realisiert, indem alle industriellen Assets und Dienste standardisierte Datenmodelle und Schnittstellen besitzen. Die Integration von Hard- und Softwarekomponenten kann durch die standardisierte Selbstbeschreibung nahtlos erfolgen, was sowohl die realen als auch die virtuellen Strukturen resilienter gestaltet.

Fundament vernetzter Wertschöpfungssysteme

Zur Realisierung einer durchgängigen Vernetzung existieren unterschiedliche Interoperabilitätslösungen [7], welche in verschiedenen Lebenszyklusphasen verwendet werden können. Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) [8] definiert einen strukturierten Rahmen zur systematischen Einordnung technischer, organisatorischer und semantischer Standards im Kontext von Industrie 4.0. Zur Integration der Shopfloor Ebene kommen folgende drei Standards [9] zur Anwendung:

- *AutomationML* – für die Asset-Entwicklung sowie die Planung des produktiven Einsatzes,
- *OPC UA* – für den produktiven Einsatz sowie die Wartung des Assets,
- *Verwaltungsschale (VWS)* – für die Kommunikation der vernetzten Welt, zuzüglich aller Inhalte (wie Typenschild, Stückliste, CO₂-Fußabdruck (PCF), etc.), die dem hergestellten Produkt zugeordnet werden können.

Ein weiterer Baustein in der Schaffung vernetzter Systeme ist der souveräne Datenaustausch. Dazu bietet Gaia-X [10] einen Satz an international geltenden Regeln, Standards und Governance-Strukturen. Dabei spielen technische Konzepte und Protokolle der International Data Spaces Association (IDSA) [11], [12] eine zentrale Rolle, insbesondere für den vertrauenswürdigen Datenaustausch, die Durchsetzung von Daten-Nutzungsrichtlinien sowie den Aufbau interoperabler und föderierter Datenräume. Erste Ausprägungen für domänenspezifische Datenräume sind beispielsweise Catena-X [13] für die Automobilbranche oder smartMA-X [4] für den Fertigungsbereich. In diesem Zuge entwickelte Catena-X den sog. Eclipse Dataspace Connector [14], welcher sich auf die Spezifikationen von Gaia-X stützt und das Datenraumprotokoll der IDSA implementiert. Im Folgenden wird der Begriff Konnektor verwendet, um die Anbindung an einen Datenraum zu beschreiben. Eine stark vereinfachte Darstellung eines Datenraums kann Abbildung 1 entnommen werden.¹

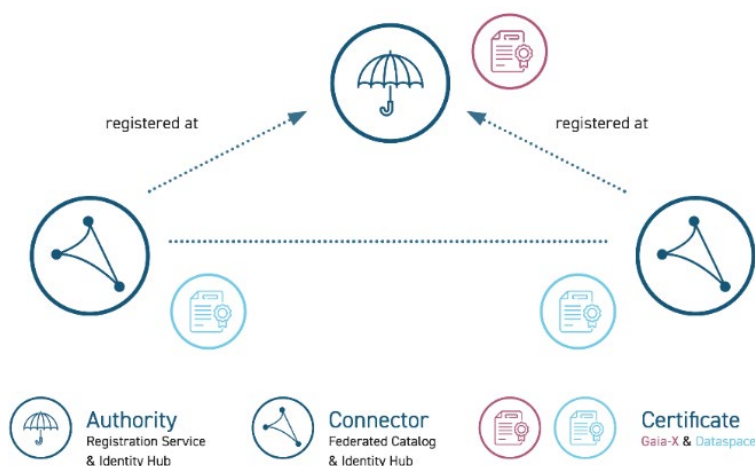


Abbildung 1: Komponenten des Datenraums¹

In digitalen Datenräumen arbeiten verschiedene Unternehmen und Organisationen zusammen, oft ohne sich persönlich zu kennen. Damit diese Kollaboration sicher und effizient funktioniert, braucht es ein technisches Vertrauensmodell. Dieses basiert auf dem sogenannten Issuer–Holder–Verifier-Prinzip [15]. Alle Beteiligten verfügen über eine eigene dezentrale Identität (DID), die eine sichere und eindeutige Identifikation ermöglicht. Auf dieser Grundlage kann jede Partei (Verifier) selbst entscheiden, welchen Herausgebern (Issuern) von digitalen Nachweisen sie vertraut und welche Informationen sie von den Inhabern (Holdern) akzeptiert.

Nach der Definition grundlegender Konzepte für vertrauenswürdigen Datenaustausch rückt nun die konkrete Umsetzung in den Fokus: Mit der SmartFactory Referenzarchitektur liegt ein anwendungsnahes Architekturmodell vor, das die strukturelle und funktionale Vernetzung von OT- und IT-Systemen in der Fabrik ermöglicht. Sie schafft damit die technische Grundlage für Interoperabilität, Modularität und sicheren Datenaustausch in digitalisierten Produktionsumgebungen.

Die Referenzarchitektur der SmartFactory

Mit der folgenden Referenzarchitektur der SmartFactory wird eine Grundlage für die nahtlose Integration von IT- und OT-Systemen geschaffen und

eine durchgängige Datenvernetzung vom Shopfloor bis in die vernetzte Welt ermöglicht. Die Architektur soll dabei zeigen, wie Komponenten intelligent gekapselt und verknüpft werden können. Hierdurch sollen neue Geschäftsmodelle entstehen, Innovationen beschleunigt, Inbetriebnahmezeiten verkürzt, die Variantenvielfalt erhöht und die Flexibilisierung von Anlagen erhöht werden. Wichtig dabei ist, bestehende Investments zu schützen und existierende Applikationen zu integrieren. Abbildung 2 repräsentiert die Bausteine der

¹ Quelle EDC-Logo: <https://github.com/eclipse-edc>
(Stand 14.10.25)

Referenzarchitektur. Die Referenzarchitektur gliedert sich in ein klar strukturiertes dreischichtiges Modell, dass die einzelnen funktionalen Ebenen einer Fabrik vom physischen Shopfloor bis zur übergeordneten IT-Infrastruktur systematisch abbildet. Diese strukturierte Gliederung hat zum Ziel, eine Zuordnung von Funktionen, Schnittstellen und Verantwortlichkeiten abzubilden, die sowohl die vertikale Integration als auch die horizontale Skalierbarkeit industrieller Systeme unterstützt:

OT-Ebene: Diese unterste Schicht umfasst Feldgeräte, Sensorik und Aktorik, die direkt mit der physischen Produktionsumgebung interagieren. Sie

bildet die Grundlage für die Datenerfassung und Prozessausführung.

IT/OT-Kopplungsebene: Als vermittelnde Schicht integriert diese Ebene Edge-Komponenten und Steuerungen. Sie ermöglicht die sichere und performante Kommunikation zwischen operativen Systemen und IT-Diensten und bildet die Schnittstelle für Datenaggregation, Vorverarbeitung und Steuerung.

IT-Ebene: Die oberste Schicht kapselt alle übergeordneten Applikationen, von klassischen ERP- und MES-Systemen bis hin zu agentenbasierten Diensten und KI-gestützten Analysemodulen. Sie stellt die

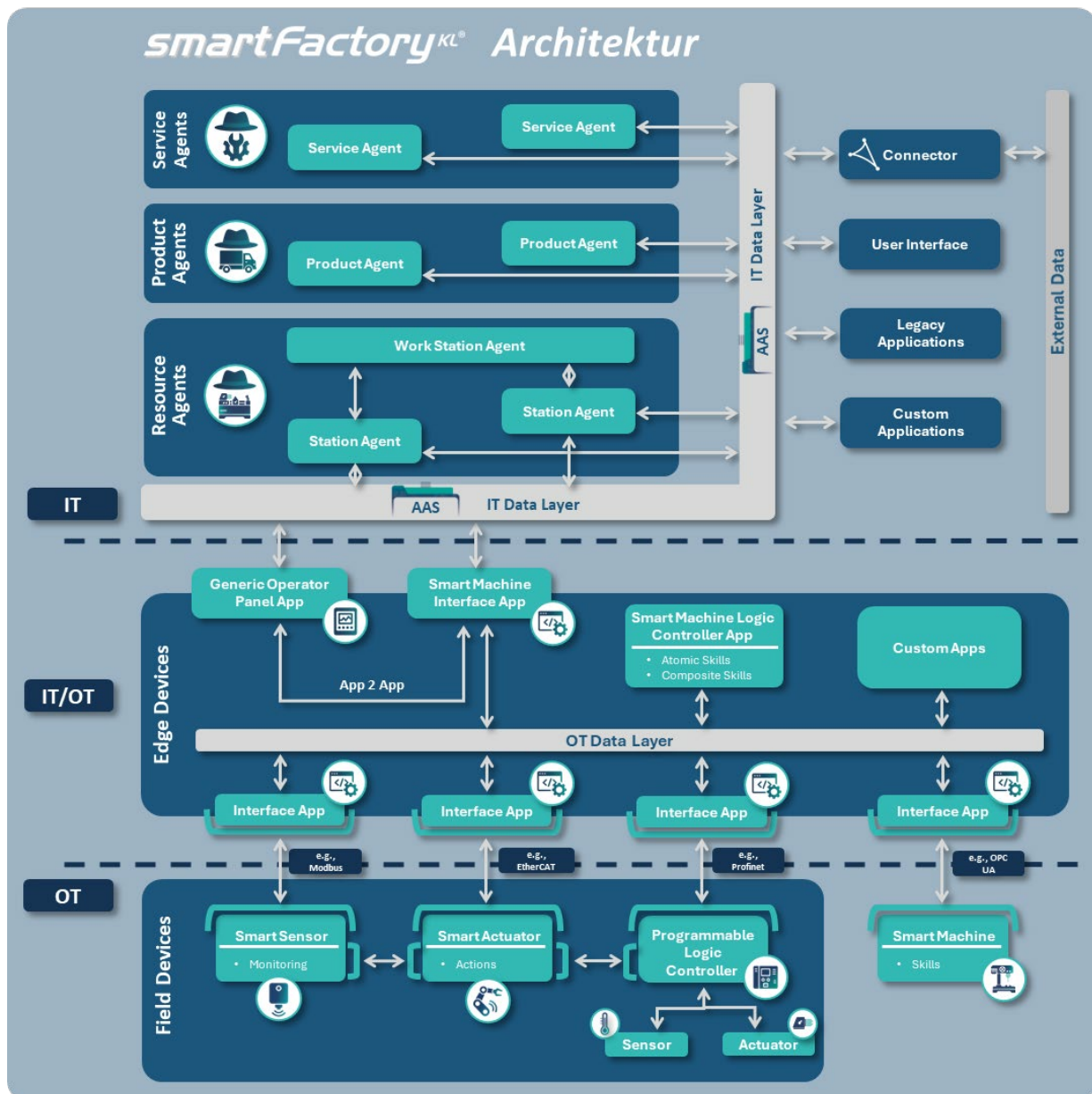


Abbildung 2: Referenzarchitektur der SmartFactory^{KL}

zentrale Instanz für Planung, Optimierung und datengetriebene Entscheidungsfindung dar.

OT-IT-Konvergenz für smarte Fabriken

Betrachtet man die Feldebene, zeigt sich, dass sich im Laufe der Zeit zahlreiche unterschiedliche Bussysteme und Protokolle entwickelt haben. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass verschiedene Hersteller spezifische Anforderungen einzelner Branchen durch eigene, teils proprietäre Lösungen abgedeckt haben. Die klassischen Bussysteme werden in der Architektur durch Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) und die zugehörigen Aktoren und Sensoren umgesetzt. Dies erschwert die Integration neuer Geräte in einer existierenden Produktion. Die neue Generation an Feldgeräten (smarte Sensoren und smarte Aktoren) beschreibt Geräte, welche eigenständig funktionieren und das direkte Auslesen von Informationen oder Ansteuern von Aktoren über definierte Schnittstellen des Edge Layers unterstützen. Beispiele sind RFID-Sensoren, welche direkt eine Weboberfläche zum Auslesen der Tags bereitstellt oder ein Roboter, welcher vordefinierte Jobs ausführen kann. In der Referenzarchitektur findet die Integration dieser smarten Geräte nicht mehr in einer klassischen SPS statt, sondern auf Edge-Geräten. Diese müssen dabei sowohl den Anforderungen an Echtzeit als auch hohen Sicherheitsstandards genügen.² Zur Integration stehen sog. Interface Applikationen bereit, welche die Daten aus den einzelnen Schnittstellen auf einen digitalen OT-Datenbus ablegen. An dieser Stelle endet die klassische Automatisierung, da die Daten aus der Feldebene nun unabhängig von herkömmlichen Steuerungssystemen verarbeitet und in frei wählbaren Programmiersprachen weiterverwendet werden können.

Hier greifen eine smarte Maschinensteuerung (Smart Machine Logic Controller) und gekapselte Automatisierungsfunktionen – sogenannte Skills – ineinander. Skills stellen die ausführbare Implementierung einer gekapselten Automatisierungsfunktion dar und erlauben dabei die flexible Inbetriebnahme und Rekonfiguration von Produktionssystemen [16]. Anstelle einer gerätezentrierten

Sichtweise erfolgt die Betrachtung von Feldgeräten und Maschinen zunehmend funktionsorientiert. Die smarte Maschinensteuerung verpackt dabei die proprietären Schnittstellen der SPSen, smarten Sensoren und smarten Aktoren in modulare Skills. Ergänzend besteht die Möglichkeit, auf bestehende Skills smarter Maschinen zuzugreifen und diese wiederzuverwenden. Auf Basis der verfügbaren Skills leitet die smarte Maschinensteuerung komplexe, höherwertige Funktionen ab. Zum einen sind diese höherwertigen Funktionen sehr flexibel, zum anderen können sie problemlos angepasst werden, ohne dass der eingebettete Steuerungscode modifiziert werden muss. Außerdem kann die zugrunde liegende Hardware ausgetauscht werden, ohne dass Änderungen an den Skills erforderlich sind.

Die smarte Maschinenschnittstelle (Smart Machine Interface) verarbeitet und wandelt die operativen Daten des OT-Datenbusses in ein standardisiertes Format um und fungiert als zentraler Zugriffspunkt auf das Netzwerk der Maschine. Hierzu empfehlen wir OPC UA for Machinery [17], [18]. So lässt sich der interoperable Maschinenzustand erfassen, die Prozessüberwachung realisieren und die semantische Dateninterpretation ermöglichen. Dabei können durch sog. Bausteine die Skills der Komponenten verfügbar gemacht werden [19]. Die standardisierte Maschinenschnittstelle erlaubt die Nutzung und Wiederverwendung einheitlicher Maschinenbedienoberflächen und Auswertetools. Dadurch müssen zum einen keine individuellen Lösungen für die Maschinensteuerung (z. B. WinCC) mehr entwickelt werden. Zum anderen erleichtert die standardisierte Bedienoberfläche die Handhabung neuer Maschinen, da Bediener sich schneller mit den Funktionen vertraut machen können. Dies führt zu verkürzten Einarbeitungszeiten, reduziert Fehlerquellen und steigert insgesamt die Effizienz im Produktionsprozess.

Mehr Wert schaffen durch kontextbezogene Datenvernetzung

Verlässt man die IT/OT-Ebene, reicht es nicht mehr aus, sich nur auf operative Daten zu fokussieren, vielmehr muss der gesamte Lebenszyklus der Assets

² Beispiele für diese Automatisierungslösungen sind die [ctrlX Automation \(Bosch Rexroth\)](#) oder die [Industrial Edge \(Siemens\)](#)

berücksichtigt werden. Die Verwaltungsschale fungiert als zentraler Zugangspunkt für sämtliche Datenpunkte eines Assets und ermöglicht die Verknüpfung dezentraler Datenquellen über standardisierte Schnittstellenbeschreibungen [20]. Dadurch wird eine einheitliche Sicht auf heterogene Datenbestände geschaffen, die statische Informationen wie Stammdaten, technische Spezifikationen oder Betriebsparameter und auch dynamische Maschinendaten umfassen. Bestehende und individuelle Anwendungen³ können durch die Konvertierung herstellerspezifischer Daten in VWS-konforme Formate nahtlos in die Referenzarchitektur integriert werden, wodurch ein durchgängiger Datenaustausch zwischen Anwendungen geschaffen werden kann. Unterschiedliche Datenquellen, wie die smarte Maschinenschnittstelle und existierende Komponenten können genutzt werden, um Daten standardisiert und automatisiert zu aggregieren. Diese aggregierten Daten ermöglichen es, Berichte zu erstellen, die den Anforderungen an Transparenz und Nachvollziehbarkeit im gesamten Asset-Lebenszyklus gerecht werden.

Die standardisierten Strukturen des digitalen IT-Datenbusses ermöglichen es, Daten über einen Konnektor direkt an bestehende Datenräume anzubinden. Der Konnektor gliedert sich dabei in das existierende Zugriffsrechtmanagement des Unternehmens ein und gibt die Zugriffe entsprechend über vereinbarte Richtlinien an berechnete Akteure frei. Somit wird Vertrauen, Datensouveränität und Sicherheit innerhalb des Ökosystems gewährleistet. Dank der semantischen Beschreibung der Daten ist es möglich, sowohl interne als auch externe Datenquellen nahtlos in den unternehmensinternen Datenbus zu integrieren. Dies schafft die Grundlage für eine datenzentrierte Unternehmenssteuerung, bei der die Herkunft der Daten unerheblich ist; entscheidend ist der geschaffene Mehrwert durch eine konsistente und skalierbare Nutzung über System- und Unternehmensgrenzen hinweg. Gerade für Anwendungen mit Künstlicher Intelligenz (KI) bietet dies große Vorteile. Der Zugriff auf kontextuell beschriebene Daten ermöglicht es, KI-Informationen effizient zu analysieren, Muster schneller zu

erkennen und fundierte Vorhersagen zu treffen. Gleichzeitig reduziert die einheitliche Struktur den Aufwand für Vorverarbeitung und schafft eine verlässliche Grundlage, wodurch KI schneller einsetzbar sowie präziser, transparenter und unternehmensweit skalierbar wird.

Smarte Produktionssteuerung durch KI-Agenten

Über den IT-Datenbus als zentralen Einstiegspunkt können dezentrale, autonome Entitäten in die Steuerung moderner Fabriken integriert werden. Dabei müssen die Zusammenhänge zwischen Datenpunkten erkannt, Entscheidungen abgeleitet und die Produktionsziele im Einklang mit der übergeordneten Unternehmensstrategie verfolgt werden. Um diese Anforderungen zu erfüllen, setzen wir auf autonome intelligente Einheiten, sogenannte Agenten [21]. Agenten agieren eigenständig und verfolgen ein Ziel, sind aber in der Lage, mit anderen Einheiten zu kooperieren. Dieses Prinzip bildet die Grundlage eines Produktionskonzepts, das speziell darauf ausgelegt ist, die Flexibilität, Skalierbarkeit und Anpassungsfähigkeit von Fertigungssystemen zu erhöhen, etwa zur Unterstützung der Produktindividualisierung oder im Umgang mit unvorhersehbaren Betriebsbedingungen [22]. Diese Agenten verwalten einzelne Assets (insbesondere Produkte und Ressourcen wie Fertigungsinseln, Module, Handarbeitsplätze oder Transporteinheiten) und repräsentieren den proaktiven Teil eines Assets. Wir verwenden eine Untergliederung in Service Agenten, Produkt Agenten und Ressourcen Agenten. Service Agenten übernehmen die Koordination des unternehmensübergreifenden Datenaustauschs sowie die Aushandlung und Bereitstellung von Services innerhalb eines Datenraums durch Verwendung von Konnektoren. Sie verhandeln den Zugriff auf Datenressourcen auf Basis definierter Richtlinien. Der Produkt Agent ist für die Produktionsplanung und -terminierung verantwortlich und leitet in Kooperation mit dem Ressourcen Agenten konkrete Produktionsaufträge ab. Der Ressourcen Agent ist für die Ausführung von Produktionsaufträgen

³ Unter Legacy- und individuellen Anwendungen sind alle bestehenden Anwendungen einer Organisation zu verstehen. Dazu

zählen unter anderem ERP-, CAD- und CAM-Systeme sowie speziell für die Organisation entwickelte Lösungen.

verantwortlich und optimiert dabei die Zeitplanung und Auslastung der jeweiligen Maschine [23], [24].

Digital Twin-driven Manufacturing in fünf Schritten

Die vorgestellte Referenzarchitektur skizziert die digitale Struktur einer selbstorganisierenden Fabrik, welche durch digitale Zwillinge gesteuert wird. Die Vision der selbstorganisierten Fabrik lässt sich nicht mit einem einzigen Technologiesprung realisieren, sie ist das Ergebnis eines schrittweisen, systematisch aufgebauten Transformationsprozesses. Abbildung 3 zeigt dabei, wie Unternehmen in fünf klar definierten Etappen von manuellen Abläufen hin zu autonom gesteuerten Produktionsprozessen gelangen können.

Der erste Schritt bildet die Basis für alle weiteren Entwicklungen. Investitionen in digitale Standards und Schnittstellen legen das Fundament für die langfristige Flexibilität und Skalierbarkeit der Fabrik. Maschinen, Anlagen und IT-Systeme müssen über einheitliche Datenmodelle und standardisierte Schnittstellen miteinander kommunizieren können. Der Einsatz der Verwaltungsschale und OPC UA legt das notwendige Fundament für eine durchgängige Datenverfügbarkeit, sowohl vertikal über Systemgrenzen hinweg als auch horizontal über den Shopfloor verteilt. Sind die grundlegenden

Datenflüsse etabliert, gilt es, die Qualität der Daten systematisch zu verbessern.

Im zweiten Schritt dienen zuverlässige Daten als Grundlage, um fundierte Entscheidungen zu treffen. Durch erste Analysefunktionen entsteht ein klarer, datenbasierter Blick auf Prozesse, Engpässe und Potenziale. Relevante Informationen werden automatisch bereitgestellt, sodass Abweichungen frühzeitig erkannt und Nachsteuerungen zeitnah eingeleitet werden können. Analysierte Daten können für ein automatisiertes Reporting genutzt werden.

Im dritten Schritt werden die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Analysen genutzt, um konkrete Optimierungsmaßnahmen abzuleiten. Durch datenbasierte Prozessverbesserungen lassen sich die Effizienz steigern, Kosten senken und die Wettbewerbsfähigkeit stärken.

In Schritt vier entsteht durch die Einführung digitaler Agenten für Produkte und Ressourcen ein Netzwerk autonom interagierender Einheiten. Diese Agenten ermöglichen eine dezentrale Steuerung. Produkte können Anforderungen kommunizieren, Ressourcen ihren aktuellen Status und ihre Verfügbarkeit melden: das bildet die Grundlage für eine dynamische Entscheidungsfindung.

Im fünften Schritt kooperieren Produkte und Ressourcenagenten eigenständig, um Produktionsaufträge effizient und flexibel umzusetzen. Die Fabrik reagiert in Echtzeit auf Veränderungen, organisiert Abläufe selbstständig und passt sich dynamisch an neue Anforderungen an.

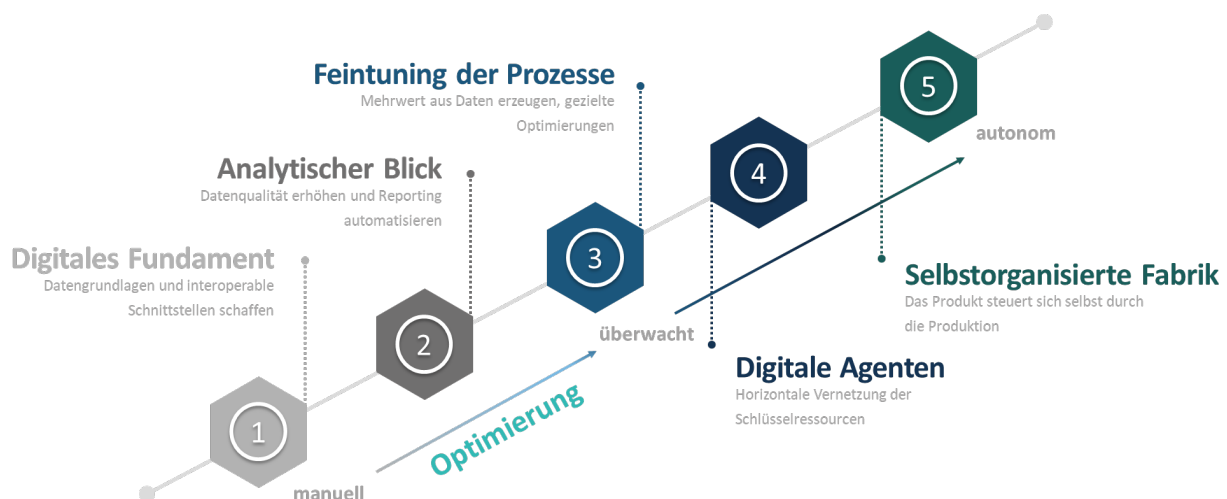


Abbildung 3: Digital Twin-driven Manufacturing in fünf Schritten

Anwendungsbeispiele

Die nachfolgenden Abschnitte zeigen anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele, wie die Referenzarchitektur Mehrwerte liefert. Effiziente Steuerungslösungen, dynamische Auftragsabwicklung und die nahtlose Integration moderner KI-Anwendungen zeigen, wie Prozesse nachhaltig optimiert werden.

Modularer Aufbau und Umsetzung der Referenzarchitektur: Produktionsinsel_PHUKET

Die Produktionsinsel_PHUKET ist ein erstes Beispiel für die Implementierung der oben beschriebenen Referenzarchitektur (siehe Abbildung 4). _PHUKET besteht aus insgesamt fünf modular gekapselten Produktionseinheiten, welche über standardisierte Hardware- und Softwareschnittstellen frei konfigurierbar sind. Die fünf Produktionsmodule unterteilen sich in ein Lagermodul, zwei Montagemodule, ein Lasermodul und ein zentrales Handhabungsmodul in der Mitte, welches Produkte zu den einzelnen Zellen transportiert. Die nachfolgende Erläuterung der Referenzarchitektur wird in zwei Abschnitte unterteilt. Zunächst wird an dem Beispiel einer Produktionseinheit erläutert, wie über die Edge-Geräte eine smarte Maschinenschnittstelle geschaffen werden kann. Im Anschluss wird anhand eines Produktionsbeispiels gezeigt, wie das Produkt die Fertigung selbstständig steuert.



Abbildung 4: Darstellung der Produktionsinsel_PHUKET

Realisierung einer smarten Maschine

Auf _PHUKET wird eine Produktionseinheit zu einer smarten Maschine, indem die Logik der Steuerung in ein Edge Gerät ausgelagert wird. Nachfolgend stellt Abbildung 5 die Bausteine eines

Montagemoduls dar, welches in Kombination mit dem Werker Produkte zusammenbaut. Dieses Montagemodul besitzt einen Roboter inklusive Greifer zur Anlieferung von Produkten, RFID-Ausleseseinheiten zur Identifikation der Produkte im Lager und einer klassischen Speicherprogrammierbaren Steuerung zur Realisierung sicherheitskritischer Aspekte. Der Roboter ist dabei mit einer eigenen app-basierten Kontrolleinheit ausgestattet, wodurch der Roboter gemäß der Architektur als smarte Maschine agiert.

Als Edge Lösung wurde auf die Siemens Industrial Edge² zurückgegriffen. Hierbei können sowohl direkt Apps aus dem Siemens-internen Appstore (z.B.: S7 Interface App zur Integration der SPS), als auch eigene Applikationen (z.B.: AutoID OPC UA Interface APP für den Datenzugriff auf smarte RFID-Sensoren [25], HTTP REST Interface App zur Ansteuerung des Greifers und gRPC Interface App zur Kontrolle des Roboters) verwendet werden, um die Daten aus dem Feld in der Edge zu integrieren. Die Maschinensteuerung (Smart Machine Logic Controller) wurde in Python umgesetzt und dient zur Orchestration anderer Skills.

Hierzu werden proprietäre Ansteuerungsmöglichkeiten in atomare Skills gekapselt und zusammengesetzte Skills abgeleitet. Diese stehen nun zur Verfügung, um mit Hilfe von Fähigkeiten flexibel auf Produktionsanfragen reagieren zu können. Die smarte Maschinenschnittstelle wird durch ein OPC UA Informationsmodell realisiert, welche die OPC UA Machinery [18] mit dem Skill-basierten Ansatz kombiniert. Um auf diese Skills zugreifen zu können, wird über die Asset Interface Description [20] der VWS auf diesen referenziert. Somit wird die OPC UA Schnittstelle mit dem IT-basierten Datenbus integriert referenziert.

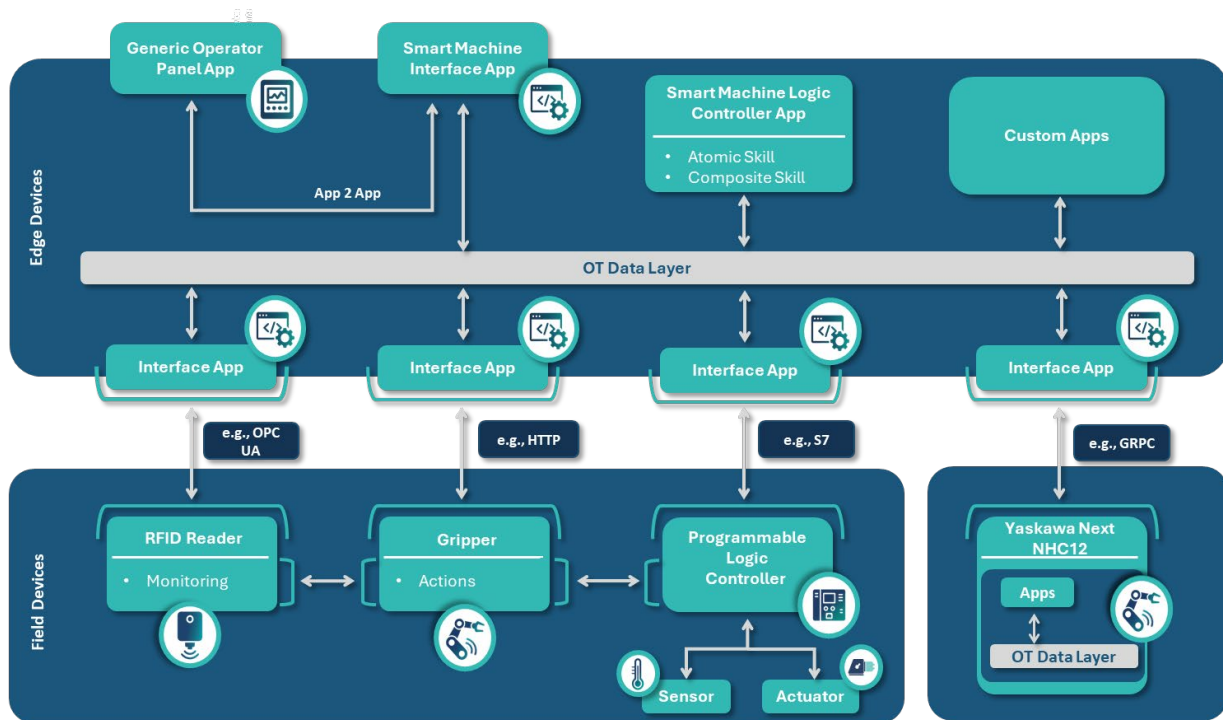


Abbildung 5: Darstellung der Steuerungsarchitektur einer smarten Maschine

Das Produkt steuert sich selbst durch die Produktion

Zur Arbeitsplanung werden die angebotenen Fähigkeiten (Capabilities⁴) von Maschinen und die benötigten Fähigkeiten in Form von Fertigungsfeatures in der VWS abgebildet. Die VWS stellt an dieser Stelle das Informationsmodell und den Datenzugriff bereit, ist aber rein reaktiv. Agenten für Ressourcen und Produkte dienen dazu, dem Produktionssystem eine aktive Komponente hinzuzufügen. Produktagenten begleiten das Produkt durch den gesamten Produktionsprozess und arbeiten gleichberechtigt mit den Ressourcenagenten zusammen, um eine flexible und reaktionsfähige Fertigung zu ermöglichen. Dies funktioniert so: Features des Produkts enthalten eine Beschreibung der individuellen Eigenschaften. Anhand dieser Features können mithilfe von Domänenwissen die erforderlichen Fähigkeiten abgeleitet werden, die zur Fertigung der Features notwendig sind. Durch einen Abgleich, das sogenannte „Matchmaking“, zwischen den benötigten Fähigkeiten und den Fähigkeiten der Produktionsressourcen lassen sich potenzielle Kandidaten für die jeweiligen Fertigungsschritte identifizieren. Aus

den ermittelten Kandidatengruppen entstehen mehrere Arbeitspläne, die unterschiedliche Ausführungsmöglichkeiten abbilden. Soll ein Produkt konkret gefertigt werden, findet eine Ausschreibung statt. Ressourcenagenten bewerben sich entsprechend der Verfügbarkeiten. Dabei werden sowohl globale Zielkriterien der Ausschreibung (globale Optimierung) als auch lokale Aspekte (Zustände und hinterlegte Maschinenaufträge - lokale Optimierung) berücksichtigt. Die Ressourcenagenten leiten aus den abstrakten Fähigkeitsbeschreibungen konkrete Skillsequenzen ab, steuern und überwachen die jeweiligen Maschinen über die smarte Maschinenschnittstelle und übermitteln die Ausführungsdaten an den Produkt Agenten. Die Produkt Agenten nutzen diese Daten, um produktindividuelle Dokumentationen, wie beispielsweise einen PCF, vollständig zu automatisieren.

⁴ Das Submodell CapabilityDescription wird von der IDTA standardisiert (Stand 10.10.2025)

Aktive Teilnahme im Manufacturing-X Ökosystem

Zur Umsetzung der Vorhaben in der Initiative Manufacturing-X [3] ist eine projektübergreifende Zusammenarbeit domänenspezifischer Projekte notwendig. Das Projekt Factory-X [26] definiert mit dem sog. MX-Port [27] ein konfigurierbares und offenes Konzept für einen dezentralisierten, vertrauenswürdigen und sicheren Datenaustausch. Daten können standardisiert und kontrolliert über Unternehmensgrenzen hinweg ausgetauscht werden. Das MX-Port Konzept gliedert den Datenaustausch in fünf klar definierte Ebenen (siehe Tabelle 1). Dabei werden unterschiedliche Konfigurationen durch die Zuordnung von ausgewählten Komponenten für die einzelnen Schichten definiert. Potenzielle Kandidaten sind dabei beispielsweise die Verwaltungsschalen-Submodelle [28], OPC UA Companion Spezifikationen [29] oder das Dataspace Protokoll [12]. Die dargestellte Referenzarchitektur zeigt dabei, wie die einzelnen Schichten des MX-Ports in einem Unternehmen umgesetzt werden können (siehe Abbildung 6).

Einheitliche, interoperable Zugriffsmechanismen mit MCP in der Produktion

Das Model Context Protocol (MCP) [30] ist ein Open-Source-Framework und -Standard, der es Systemen mit künstlicher Intelligenz, insbesondere großen Sprachmodellen (LLMs), ermöglicht, sich nahtlos mit externen Tools, Datenquellen und Systemen zu verbinden. Durch standardisierte und semantische Informationsmodelle können LLMs dabei den Kontext interpretieren und entfalten ihre volle Wirksamkeit. Durch die Nutzung einer standardisierten Maschinenschnittstelle mit Hilfe von OPC UA und den Einsatz der Verwaltungsschale liegen die Daten innerhalb der Referenzarchitektur semantisch beschrieben vor. Durch MCP können LLMs direkt mit diesen Schnittstellen interagieren. So können Daten mit natürlicher Sprache abgefragt werden. Interaktionen wie „wie viele Teile wurden in der letzten Stunde produziert?“ oder „verfahre die Achse!“ werden dadurch automatisiert und ohne Mehraufwand realisiert.

Tabelle 1: Darstellung der Schichten bzw. Layer (L) des MX-Ports [27]

Schicht (L1-5)	Funktion
Discovery L5	... wird verwendet, um Geschäftspartner, Datenbestände (z. B. Geräte) oder Geschäftsanwendungen zu finden.
Access & Usage Control L4	... wird verwendet, um sicherzustellen, dass Datenanbieter den Datenzugriff und die Datennutzung definieren sowie den Zugriff und die Nutzung der bereitgestellten Daten einschränken können.
Gate L3	... wird verwendet, um Daten auf einheitliche Weise auszutauschen.
Converter L2	... stellt das semantische Modell für die auszutauschenden Daten bereit.
Adapter L1	... ermöglicht den Datenzugriff durch eine applikationsspezifische Datenanbindung.

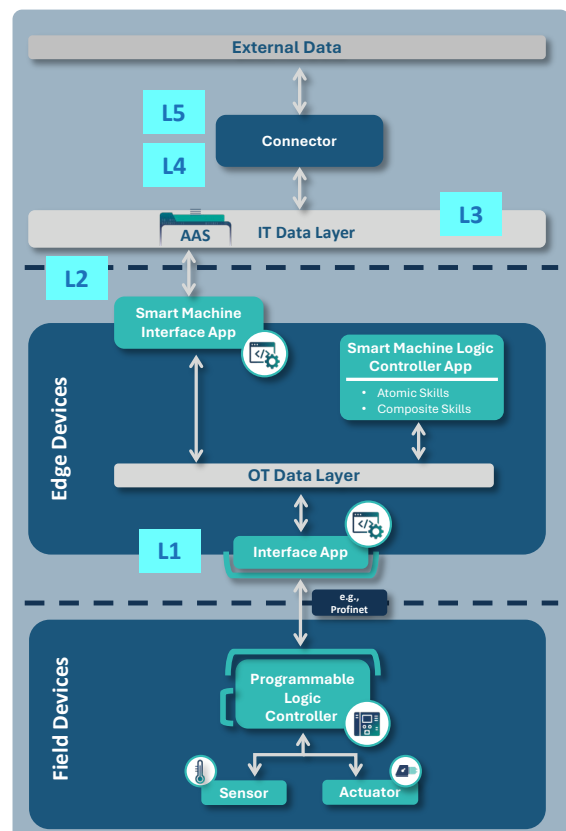


Abbildung 6: Integration des MX-Ports in die SmartFactory Architektur

Verwaltungsschale als Enabler für interoperables Wissensmanagement

An der Herstellung von Produkten sind viele verschiedene Entitäten in der Fertigung beteiligt, die viele Daten erzeugen. Gleichzeitig existieren große Mengen an Wissen und Informationen über die Entitäten und ihre Beziehungen zueinander. Dies kann in den digitalen Zwillingen der Entitäten durch den Einsatz von Verwaltungsschalen interoperabel abgebildet werden. Auch die Beziehungen zwischen den beteiligten Elementen können in Verwaltungsschalen dargestellt werden.

Um komplexe Zusammenhänge abbilden zu können, eignen sich Wissensgraphen, die grundlegend ein Netzwerk aus Entitäten, Properties und deren Beziehungen darstellen. Damit die große Informations- und Datenmenge, die in den Verwaltungsschalen abgelegt und referenziert ist, effizient nutzbar gemacht werden kann, werden Verwaltungsschalen in Form von Wissensgraphen dargestellt. Die beiden Repräsentationen existieren dabei nebeneinander und synchronisieren sich gegenseitig. Das Metamodell der Verwaltungsschale und deren Infrastruktur bildet dafür die strukturelle Grundlage.

Durch die dezentrale Vernetzung der Verwaltungsschalen und die mächtigen Abfragemöglichkeiten von Graphdatenbanken kann das abgebildete Wissen für verschiedene Anwendungen genutzt werden. Zunächst wird es möglich, Abfragen an das verteilte System zu stellen, wie bspw. „Ist ein AGV verfügbar, welches ein Produkt mit einem Gewicht von 5 kg transportieren kann?“. Der Wissensgraph kann entweder direkt abgefragt werden oder in Kombination mit MCP als Eingangsquelle zur Interaktion mit dem Nutzer in natürlicher Sprache.

Des Weiteren sind komplexere Analysen möglich, bei denen Ähnlichkeitsalgorithmen eingesetzt werden. Hier können z.B. aufgetretene Fehlerfälle mit Fehlern von anderen Maschinen verglichen werden. Handlungsempfehlungen, die an anderer Stelle bereits etabliert sind, können dadurch auch hier eingesetzt werden.

Shared Production

Eine digitale Plattform oder ein dezentrales Produktionsnetzwerk, das automatisiert Auftraggeber mit

Auftragsfertigern verbindet und gleichzeitig resiliente Lieferketten fördert, bietet das Potenzial, die Beschaffungskosten von Unternehmen zu reduzieren und die Auftragsvergabe bis hin zur Maschinenebene effizient zu steuern. Damit Shared Production funktioniert, müssen Unternehmen miteinander vernetzt sein, ihre Dienstleistungen anbieten sowie effektiv kommunizieren können, um eine gemeinsame Lieferkette zu bilden. Darüber hinaus müssen sie in der Lage sein, Produktionsanfragen intern zu bearbeiten und umzusetzen. Im Projekt smartMA-X [4] konnte gezeigt werden, wie eine solche Produktion umgesetzt werden kann.

Mit der Referenzarchitektur der SmartFactory wird nun gezeigt, wie sich Unternehmen durch den Einsatz der Verwaltungsschale und Konnektoren in ein solches Datenökosystem eingliedern können. Dienstleistungen können über die VWS interoperabel angeboten oder aufgerufen werden und direkt in die unternehmensinterne Datenstruktur eingegliedert werden. Als Beispiel dient hier `_PHUKET` als Teil der Shared Production Kaiserslautern (siehe Abbildung 7) und Bereitsteller von Dienstleistungen wie beispielsweise der Montage.



Abbildung 7: Shared Production Kaiserslautern

Fazit

Die vorgestellte Referenzarchitektur bietet produzierenden Unternehmen einen klaren Orientierungsrahmen, um den steigenden Markt- und Technologiedruck souverän zu bewältigen. Sie unterstützt eine konsistente Datenstrategie, ermöglicht eine schrittweise Modernisierung bestehender

Produktionsumgebungen und schafft durch Offenheit und Skalierbarkeit die Voraussetzungen für die Integration zukünftiger Schlüsseltechnologien.

Zusammengefasst bedeutet dies:

- Wettbewerbsfähigkeit durch Interoperabilität in einem plattformdominierten Markt,
- Effizienzsteigerung durch durchgängige Datenverfügbarkeit und intelligente Systeme,
- Wissenssicherung und -weitergabe trotz Fachkräftemangel,
- und Innovationspotenziale durch KI, datenbasierte Services und flexible Produktionsketten.

Die Anwendungsbeispiele zeigen eindrücklich: Die SmartFactory Referenzarchitektur bildet eine belastbare Grundlage für nachhaltigen Erfolg in einer vernetzten, datengetriebenen und kollaborativen Industrie. Damit bietet sie heute einen Referenzrahmen und unterstützt morgen die nachhaltige Transformation industrieller Prozesse.

Literaturverzeichnis

[1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Hrsg., „Whitepaper ‚Manufacturing-X‘: Eckpunkte für die Umsetzung von ‚Manufacturing-X‘ im produzierenden Gewerbe zur Sicherung des Wettbewerbsstandortes Deutschland“. 2022. Zugriffen: 14. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Manufacturing-X_lang.pdf?__blob=publicationFile&v=2

[2] Deutsche Industrie- und Handelskammer (DIHK), Hrsg., „Fachkräftemangel trifft auf Strukturprobleme Neuer DIHK-Report mit konkreten Vorschlägen zur Mobilisierung von Personal“. 2024. Zugriffen: 14. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dihk.de/resource/blob/127242/6ffb666cfa53e926e07b3cf91d5d021f/fachkraefte-dihk-report-fachkraeftesicherung-2024-2025-data.pdf>

[3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Förderprogramm ‚Manufacturing-X‘ Die Unterstützung des Datenökosystems für eine intelligent vernetzte Industrie Einleitung“. Zugriffen: 14. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Dossier/manufacturing-x.html>

[4] S. Jungbluth u. a., „smartMA-X: Mit Datenräumen in die Produktion der Zukunft“. SmartFactory-KL, 2024.

[5] Industrial Digital Twin Association, *Specification of the Asset Administration Shell Part 1: Metamodel – IDTA Number: 01001-3-0*, 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://industrial-digitaltwin.org/wp-content/uploads/2023/06/IDTA-01001-3-0_SpecificationAssetAdministrationShell_Part1_Metamodel.pdf

[6] DIN SPEC 16593-1:2018-04 RM-SA - Referenzmodell für Industrie 4.0 Servicearchitekturen - Teil 1: Grundkonzepte einer interaktionsbasierten Architektur. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/din-spec-16593-1/287632675>

[7] R. Drath u. a., „Diskussionspapier – Interoperabilität mit der Verwaltungsschale, OPC UA und AutomationML Zielbild und Handlungsempfehlungen für industrielle Interoperabilität“. 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2023/04/Diskussionspapier-Zielbild-und-Handlungsempfehlungen-fur-industrielle-Interoperabilitat-5.3-protected.pdf>

[8] DIN SPEC 91345:2016-04: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/din-spec-91345/250940128>

[9] Plattform Industrie 4.0, Hrsg., „Die Verwaltungsschale im Detail von der Idee zum implementierbaren Konzept“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/verwaltungsschale-im-detail-praesentation.pdf?__blob=publicationFile&v=1

[10] Gaia-X European Association for Data and Cloud AISBL, Hrsg., „Gaia-X Architecture Document - 25.05 Release“. 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://docs.gaia-x.eu/technical-committee/architecture-document/25.05/>

[11] International Data Spaces Association, Hrsg., „IDS-RAM V4.2.0“. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://github.com/International-Data-Spaces-Association/IDS-RAM_4_0/releases/tag/v4.2.0

[12] P. Koen u. a., „Dataspace Protocol 2025-1“. 2025. Zugriffen: 14. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://eclipse-dataspace-protocol-base.github.io/DataspaceProtocol/2025-1/>

[13] „Catena-X: Your Automotive Network“. Zugriffen: 14. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://catena-x.net>

[14] Eclipse Foundation AISBL, „Data-sharing at scale“. Zugriffen: 14. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://eclipse-edc.github.io/>

[15] M. Sporny, D. Longly, D. Chadwick, und I. Herman, „Verifiable Credentials Data Model v2.0“. 2025. Zugriffen: 14. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.w3.org/TR/vc-data-model-2.0/>

[16] Plattform Industrie 4.0, Hrsg., „Information Model for Capabilities, Skills & Services - Definition of terminology and proposal for a technology-independent information model for capabilities and skills in flexible manufacturing“. 2022. Zugriffen: 30. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/CapabilitiesSkillsServices.pdf?__blob=publicationFile&v=1

[17] OPC Foundation, „OPC UA for Machinery Standard for the entire mechanical engineering sector“. Zugriffen: 14. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://opcfoundation.org/markets-collaboration/opc-ua-for-machinery/>

- [18] OPC 40001-1: Machinery Basic Building Blocks, 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://reference.opcfoundation.org/Machinery/v104/docs/>
- [19] VDMA e.V. und Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV, Hrsg., „Capabilities and Skills in Production Automation: Consolidating the concept from the perspective of the mechanical and plant engineering industry with a focus on OPC UA“. 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vdma.eu/documents/34570/77803117/Capabilities_and_Skills_in_Production_Automation_DE.pdf/9663fef4-a065-abc6-2d38-687fed93c667?filename=Capabilities_and_Skills_in_Production_Automation_DE.pdf
- [20] Industrial Digital Twin Association, „IDTA 02017-1-0 Asset Interfaces Description“. 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://github.com/admin-shell-io/submodel-templates/blob/main/published/Asset%20Interfaces%20Description/1/0/IDTA%2002017-1-0_Submodel_Asset%20Interfaces%20Description.pdf
- [21] A. Giret und V. Botti, „Holons and agents“, *J. Intell. Manuf.*, Bd. 15, Nr. 5, S. 645–659, Okt. 2004, doi: 10.1023/B:JIMS.0000037714.56201.a3.
- [22] H. Van Brussel, J. Wyns, P. Valckenaers, L. Bongaerts, und P. Peeters, „Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA“, *Comput. Ind.*, Bd. 37, Nr. 3, S. 255–274, 1998.
- [23] S. Jungbluth u. a., „Dynamic Replanning using Multi-Agent Systems and Asset Administration Shells“, in *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Stuttgart, Germany: IEEE, Sep. 2022, S. 1–8. doi: 10.1109/ETFA52439.2022.9921716.
- [24] A. T. Bernhard u. a., „I4.0 Holonic Multi-agent Testbed Enabling Shared Production“, in *Artificial Intelligence in Manufacturing*, J. Soldatos, Hrsg., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, S. 231–250. doi: 10.1007/978-3-031-46452-2_13.
- [25] OPC 30010: AutoID Devices, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://reference.opcfoundation.org/AutoID/v101/docs/>
- [26] „FACTORY-X Das digitale Ökosystem“. Zugegriffen: 14. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://factory-x.org/de/>
- [27] Factory-X, Hrsg., „MX-Port Concept Enable data sharing across industries“. 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://factory-x.org/wp-content/uploads/MX-Port-Concept-V1.00-1.pdf>
- [28] Industrial Digital Twin Association, „Submodel Template Repository“. Zugegriffen: 14. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://smt-repo.admin-shell-io.com/>
- [29] OPC Foundation, „OPC UA Companion Specifications“. Zugegriffen: 14. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/OPCFoundation/UA-Nodeset>
- [30] „Model Context Protocol Specification“. Zugegriffen: 14. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://model-contextprotocol.io/specification/2025-06-18>