smartMA-X: Mit Datenräumen in die Produktion der Zukunft

smartFactory KL®

smart MA-X

Einleitung

Vorwort

Das Projekt smartMA-X war der Startschuss für unsere Arbeiten rund um Gaia-X Anfang 2020. SmartMA-X ermöglichte den Aufbau einer verteilten Produktion in Kaiserslautern, die über das Gaia-X-Ökosystem verschiedene Produktionsinseln miteinander vernetzt.

Gemeinsam produzieren sie in verteilten Rollen ein Beispielprodukt, einen Modell-LKW. Als Grundlage diente uns die Vision *Production Level 4*, die wir 2019 als Update von Industrie 4.0 formuliert hatten. Insofern war unser erstes sichtbares Arbeitsergebnis der *Production Level 4*-Demonstrator, der einen individualisierten USB-Stick herstellte. Heute heißt er Produktionsinsel_JAVA und ist Teil unserer Shared Production. Das aufgebaute Ökosystem gilt als beispielhaft für die Produktion der Zukunft. Darin implementiert sind Technologien wie 5G, Verwaltungsschalen, KI-Methoden, flexible Module, automatisierte Freigaben, Werkerassistenzen, Operational Safety Intelligence und Industrial Edge Cloud-Lösungen. Das BMWK hat mit der Projektfreigabe von smartMA-X echte Weitsicht bewiesen. Wir sind froh, dass unsere Forschungsergebnisse mittlerweile von der Industrie aufgegriffen und im Kontext von Datenräumen diskutiert werden. Parallel können die Technologien mit Manufacturing-X weiterentwickelt werden. In diesem Sinne wünsche ich viele neue Erkenntnisse bei der Lektüre dieser informativen Seiten.

Prof. Dr.-Ing. Martin Ruskowski
Vorstandsvorsitzender *SmartFactory*KL

IMPRESSUM

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

T +49 (0) 631 / 20575-3401
F +49 (0) 631 / 20575-3402
M info@smartfactory.de
W www.smartfactory.de

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

+ Simon Jungbluth
+ Keran Sivalingam
+ Jesko Hermann
+ Benjamin Blumhofer
+ Manuel Reif
+ Andreas Wagner
+ Hendrik Schäfer
+ Marco Simon
+ Alexander Witton
+ Kuno Zoltner
+ Nils Walter
+ Fabian Kirchhöfer
+ Carsten Harms
+ Teresa Petzsche
+ Christiane Plociennik
+ Achim Wagner
+ Simon Bergweiler
+ Martin Ruskowski
+ Ingo Herbst
+ Maximilian Spengler

Quellenangabe Bilder: Christopher Arnoldi, A. Sell, DFKI/Jürgen Mai

Stand: Februar 2024

Liebe Leserinnen und Leser,

wir freuen uns, Ihnen unser Whitepaper über das Projekt »Modulare Smart Manufacturing Gaia-X Testumgebung«, kurz smartMA-X, präsentieren zu dürfen. Gaia-X, Manufacturing-X oder Datenraum Industrie 4.0 sind aktuell in aller Munde und mittlerweile gibt es auch erste Ergebnisse. Wir von der *SmartFactory*KL zeigen mit dem Projekt smartMA-X, wie der Datenraum für die produzierende Industrie aussehen kann. Unsere Expertinnen und Experten haben in den letzten drei Jahren umfassende Erkenntnisse gesammelt, die in der ersten Gestaltung eines Datenraum Industrie 4.0 münden. In diesem Whitepaper präsentieren wir Ihnen die visionären Konzepte und den technischen Aufbau von smartMA-X. Wir laden Sie ein, die spannenden Ergebnisse unserer Arbeit zu entdecken und wünschen Ihnen viel Freude und neue Einsichten beim Lesen.

Mit besten Grüßen

Simon Jungbluth
& Keran Sivalingam
Researcher *SmartFactory*KL

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

seit Januar 2021 fördert das BMWK die *SmartFactory*KL bei der Implementierung einer Produktionsumgebung für Shared Production nach Gaia-X-Prinzipien. Der seitdem in smartMA-X entstandene Demonstrator zeigt eindrucksvoll, wie Unternehmen werks- und firmenübergreifend produzieren können, ohne die Kontrolle über die eigenen Daten aufzugeben.

Dabei arbeitet das Projekt eng zusammen mit der Plattform Industrie 4.0, Gaia-X, Catena-X und Manufacturing-X und leistet einen wertvollen Transfer für den Aufbau datenbasierter Ökosysteme.

Ich danke den Beteiligten für ihren großen Einsatz und wünsche dem Projekt weiterhin viel Erfolg!

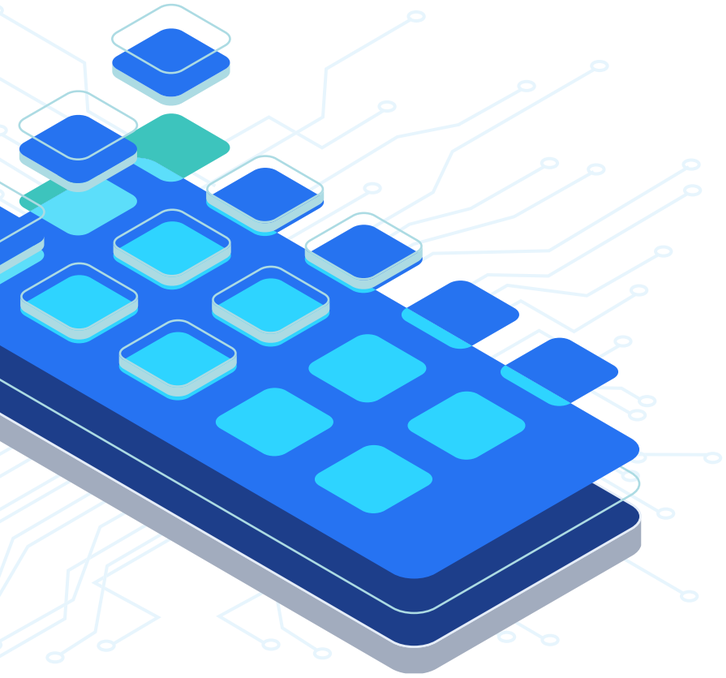
Ernst Stöckl-Pukall
Referatsleiter für Digitalisierung und Industrie 4.0 im Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

Liebe Leserinnen und Leser,

Sechs von zehn Unternehmen tauschen hierzulande keine Daten mit Dritten aus. Warum? Weil Datenaustausch bisher mit jedem Partner hart verdrahtet sein muss: rechtlich, organisatorisch, technisch. smartMA-X zeigt für die Produktion, dass es anders geht: durch ein Datenökosystem auf Basis von Gaia-X.

Persönliche Beziehungen sind nicht mehr nötig für datenbasierte Kooperation. Gemeinsame Regeln, Standards und Technologien sorgen auch unter anonymen Akteuren für Datensouveränität und Datenverfügbarkeit. Gaia-X macht Vertrauen maschinenlesbar.

Jan Fischer
Projektleitung Gaia-X Hub Germany



Inhaltsverzeichnis

Einleitung

+ Impressum 02
+ Vorwort 02
+ Inhaltsverzeichnis 04

01

Motivation, Ideen und Ziele 06

+ Europas digitale Souveränität: Das Gaia-X-Ökosystem 07
+ Gaia-X auf dem Prüfstand: Das Testbed der *SmartFactory*KL 08
+ Eine Reise durch den Datenraum von Industrie 4.0 09

02

Resilienz mit Produktionsnetzwerken: Eine Vision im Rahmen des Gesamtsystems smartMA-X 10

+ Die Shared Production der *SmartFactory*KL 10
+ Aufbau einer Produktionsinsel 13

03

Erleben Sie unser dynamisches Netzwerk von Demonstrationsprojekten im Ökosystem 17

+ Die Produktionsinsel_KUBA 18
+ Die Produktionsinsel_SYLT 19
+ Die Produktionsinsel_JAVA 20
+ Die Produktionsinsel_MILOS 21
+ Die Produktionsinsel_CAPRI 22
+ Die Produktionsinsel_SKYE 23

04

Der Produktlebenszyklus mit Verwaltungsschale in der Praxis 24

+ Der Digitale Produktpass 24
+ Modell-LKW als Beispielprodukt 26
+ Verwaltungsschale als Digitaler Produktpass 28

05

Das smartMA-X-Ökosystem 32

+ Anforderungen zur Erstellung dynamischer Lieferketten 33
+ Komponenten des Datenraums 34
+ Der Konnektor 35
+ Federated Service Catalogue 37
+ Integration externer Services 39

06

Mit Produktions-Skills zur automatisierten Produktion von Morgen 40

+ Aufbau und Standardisierung von Skills 41
+ Einsatz von Skills am Beispiel einer Werkzeugmaschine 44

07

Flexible Produktionsplanung und -steuerung: Die Rolle von Multi-Agenten-Systemen in komplexen industriellen Systemen 46

+ Agenten und Holons 47
+ Holonische Architektur für Unternehmen 49
+ Darstellung der Produktion als Holon 50

08

Transfer 52

+ Förderprojekt TWIN4TRUCKS
+ Newsletter
+ *SmartFactory*KL Live
+ Hannover Messe
+ Market-X
+ Tech-X
+ Veröffentlichungen

01

Motivation, Ideen und Ziele

Die Geburt von smartMA-X: Das Modulare Smart Manufacturing Testbed Gaia-X und der Weg zum Datenraum der Industrie 4.0

Das Projekt smartMA-X ist das Ergebnis einer ambitionierten Idee: die Shared Production, bei der Unternehmen in Datenräumen zusammenarbeiten, um gemeinsam effizient, nachhaltig und gegen äußere Einflüsse gewappnet zu produzieren. Aber es galt eine große Hürde zu überwinden: Das sichere Teilen von Daten untereinander als Voraussetzung für wertschöpfende Zusammenarbeit in einem vernetzten System.

Die *SmartFactory*[KL] beschäftigt sich seit Jahren mit der Frage, wie deutsche und europäische Unternehmen, insbesondere aus dem Mittelstand, wettbewerbsfähig bleiben und die Produktion für die Zukunft ausrichten können. Als Update der Idee von Industrie 4.0 entstand die Vision *Production Level 4* (PL4). Sie geht von der konsequenten Nutzung der Industrie 4.0-Technologien und der entstehenden Vernetzung von Maschinen und Unternehmen zu einem dezentralen, resilienten und nachhaltigen Produktionsnetzwerk aus, der verteilten Produktion. Zugrunde liegt eine gekapselte Architektur, der Einsatz hochentwickelter KI-Methoden und die Nutzung von Datenräumen als Wertschöpfungsnetzwerke, worin Maschinen und Software ihre Skills anbieten können. Als Voraussetzung dafür dienen Technologien wie Digitale Zwillinge (Verwaltungsschalen [VWS]) oder 5G-Kommunikation, um zukünftig neue Geschäftsmodelle, die schnellere Einführung von neuen Produktgruppen oder die Anpassbarkeit von Produktionseinheiten zu ermöglichen.

Die *SmartFactory*[KL] arbeitet in Arbeitsgruppen (AGs) mit ihren Mitgliedern an der praktischen Umsetzung der Shared Production und hat dafür 2020 mit dem Aufbau eines Demonstrator-Ökosystems begonnen, dass die Prinzipien von *Production Level 4* anwendet. So wird die Vision von PL4 Stück für Stück realer, rückt die subsidiär organisierte Produktion näher und unterstützt den Menschen in der Produktion wie irgend möglich. Das modulare, herstellerunabhängige PL4-Ökosystem besteht aus mehreren Produktionsinseln an drei Standorten, wo auch neueste Technologien zur Steuerung und Digitalisierung der Produktion von Vereinsmitgliedern getestet und ausprobiert werden können.[1] Dazu kommen Maschinenmodule von externen Unternehmen, die sich an den Datenraum der *SmartFactory*[KL] andocken, um Teil der dynamischen Lieferketten zu werden. So z.B. die ARENA2036 mit ihrem Modul von der Firma PILZ im Juni 2023[2].

Die Idee zu Gaia-X[3] entstand im Jahr 2019, parallel zur Vision PL4. Gaia-X ist eine europäische Initiative zur Schaffung von Transparenz, Kontrollierbarkeit, Übertragbarkeit und Interoperabilität von Daten und Diensten zur Erstellung eines Ökosystems. Darin sollen Daten nach europäischen Datenschutzkriterien ausgetauscht werden können, wobei der Eigentümer der Daten niemals die Kontrolle über seine Daten abgibt und jederzeit darüber verfügt. Es stellte sich heraus, dass die Ideen von PL4 und Gaia-X wie füreinander geschaffen sind. Die Synergiemöglichkeiten zwischen den beiden Konzepten waren offensichtlich, und so wurde die Idee für smartMA-X geboren. smartMA-X verfolgt das Ziel der Integration von Produktionseinheiten in einem gemeinsamen Produktionsnetzwerk. Dieses Produktionsnetzwerk soll es den Teilnehmern ermöglichen, Produktionsdienstleistungen (Services) anzubieten und in Anspruch zu nehmen – ähnlich dem Konzept von Manufacturing-as-a-Service. Diese Dienstleistungen reichen von der gemeinsamen Nutzung von Produktionskapazitäten bis hin zur Bereitstellung von Daten- & Analyse-Services, einschließlich Künstlicher Intelligenz. Dabei sollen die Prinzipien von Gaia-X stets gewahrt werden.

Mit diesen Prinzipien wird ein wichtiger Schritt in Richtung einer vernetzten und datengesteuerten Zukunft, wie sie schon Industrie 4.0 skizzierte. Die konkrete Kombination der Idee von *Production Level 4* und Gaia-X eröffnet neue Möglichkeiten für Unternehmen, die von einer verbesserten Zusammenarbeit und einem effizienteren Datenaustausch profitieren möchten. Diese Partnerschaft stellt die Weichen für die Zukunft der Industrie. Sie wird gleichzeitig die Vision eines souveränen und sicheren Datenraumes vorantreiben, wie sie aktuell (Anfang 2024) als Manufacturing-X[4] Gestalt annimmt. In der sich ständig verändernden Welt der Industrie stellt smartMA-X zweifellos einen Meilenstein dar und ebnet den Weg für Innovation und Fortschritt als Teil der 4. Industriellen Revolution.

Europas digitale Souveränität: Das Gaia-X-Ökosystem

> *»An ecosystem is a geographic area where plants, animals, and other organisms, as well as weather and landscape, work together to form a bubble of life[5]«*

Gaia-X repräsentiert eine zukunftsweisende und ambitionierte europäische Initiative, die darauf abzielt, ein umfassendes und interoperables digitales Ökosystem für Europa aufzubauen. Im Kern steht die Entwicklung einer europäischen Dateninfrastruktur, die auf den Prinzipien der Datensouveränität und -sicherheit basiert. Dieses Ökosystem ermöglicht es Unternehmen und Organisationen, Daten auf sichere Weise auszutauschen und dabei die volle Kontrolle über ihre Daten zu behalten.

Ein wesentliches Ziel ist es, ein transparentes, interoperables System zu schaffen, das den europäischen Werten von Datensicherheit und -souveränität entspricht. Die Infrastruktur und das gesamte Ökosystem sind darauf ausgerichtet, wobei Open-Source-Prinzipien eine zentrale Rolle spielen. Diese Herangehensweise unterscheidet Gaia-X deutlich von anderen Cloud-Computing-Angeboten, Services und Ökosystemen auf dem Markt, wie bspw. den bekannten Hyperscalern.

1 *Vgl. Production Level 4 – Der Weg zur zukunftssicheren und verlässlichen Produktion, https://smartfactory.de/wp-content/uploads/2022/05/SF_Whitepaper-Production-Level-4_WEB.pdf*
2 *Vgl. https://www.smartfactory.de/datenraum-gaia-x-arena2036-liefert-bauteile-nach-kaiserslautern/*
3 *Gaia-X Architeture Document – 23.10 Release: https://docs.gaia-x.eu/technical-committee/architecture-document/latest/*
4 *Manufacturing-X: https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Manufacturing-X/Initiative/initiative-manufacturing-x.html*
5 *Zitat aus: National Geographic Society. (2011, August 15). Ecosystem. National Geographic Society. https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/ecosystem/*

Motivation, Ideen und Ziele

Projekt Keyfacts

Laufzeit Monate: 41

Projektträger: VDI-TZ

Fördergeber: BMWK

Ergebnisse

Messen: 2

Produktionsinseln: 5

Veröffentlichungen: 9

Gaia-X auf dem Prüfstand: Das Testbed der SmartFactory^{KL}

Die Frage nach der Umsetzung dieser Gaia-X-Prinzipien und wie sie für die produzierende Industrie effektiv genutzt werden können, war eine Herausforderung, die eine gründliche Analyse erforderte. Die Ergebnisse dieser Forschung sollten den hohen Anforderungen der Industrie gerecht werden. Um diese Ambitionen zu erfüllen, war die Schaffung eines physischen Testbeds unabdingbar, auf dem Inhalte und Ideen praktisch erprobt werden konnten. Hier kam die bereits existierende Demonstrator-Landschaft der *SmartFactory^{KL}* ins Spiel. Diese bereits mit Industrie-Unternehmen aufgebaute Umgebung bot den idealen Ausgangspunkt, um die Konzepte von Gaia-X in der Praxis zu evaluieren. Im Rahmen des Projekts wurde das bestehende Ökosystem durch zusätzliche Produktionsmodule und -inseln erweitert. Die Schaffung und Erweiterung des Testbeds aus dem Projekt heraus war von entscheidender Bedeutung, da es die Möglichkeit bot, die Leistungsfähigkeit und die Potenziale von Gaia-X in einer realen Produktionsumgebung zu testen. Dies ermöglichte es, die Integration von Gaia-X-Konzepten in bestehenden Produktionsprozessen zu evaluieren und sicherzustellen, dass die erarbeiteten Ergebnisse auch den strengen Anforderungen der Industrie standhalten. Wesentlicher Kern des Ansatzes ist es, innovative Ideen und Technologien auf ihre Praxistauglichkeit hin zu überprüfen und damit einen Schritt in Richtung einer vernetzten und datengesteuerten Zukunft der produzierenden Industrie zu gehen. Das Projekt smartMA-X als Testbed zu konzipieren, hat sich dabei als ein entscheidendes Werkzeug erwiesen, um die Ansprüche der Industrie bei der Nutzung von Datenräumen und die Implementierung selbiger zu erfüllen, sowie die Potenziale dieses vielversprechenden Konzepts zu demonstrieren.

Eine Reise durch den Datenraum von Industrie 4.0

In unserer Broschüre laden wir Sie auf eine spannende Reise ein. Wir starten auf dem Shopfloor unserer Demofabrik. Wir erklären, wie wir Produktionseinheiten in einem gemeinsamen Datenraum zusammenführen. Sie erfahren, wie wir Manufacturing-as-a-Service-Konzepte mit Hilfe eines föderierten Service Kataloges umsetzen und sehen, wie wir datengetriebene Services wie Anwendungen der Künstlichen Intelligenz in diese Prozesse einbinden. Wir beleuchten außerdem die Mehrwerte und Potenziale, die sich aus dieser innovativen Herangehensweise ergeben können. Warum ist es so wichtig, Datenräume zu erforschen und umzusetzen? Welche Vorteile bieten sie für Unternehmen und die gesamte Branche?

02

Resilienz mit Produktionsnetzwerken: Eine Vision im Rahmen des Gesamtsystems smartMA-X

Besonders für den deutschen Markt bietet die Shared Production ein großes Potential. Deutlich wird dies anhand der Automobilindustrie als einem der wichtigsten Wirtschaftszweige in Deutschland. Fast 80 % der Wertschöpfungen liegen außerhalb der Original Equipment Manufacturer (OEM) und fast 60 % bei Tier-2- oder Tier-3-Zulieferern. Solche komplexen Lieferketten sind sehr schwer gegen Unsicherheiten abzusichern. Kommt es zu kurzfristigen Ausfällen in der Lieferkette, ist es sehr zeit- und kostenintensiv, alternative Lieferanten zu finden, da der deutsche Markt mit über 92 % KMU sehr fragmentiert und intransparent ist.[6]

KMU mangelt es an IT-Fachkräften und an großen Budgets zur Einführung von Software. Damit diese Unternehmen an einem Wertschöpfungsnetzwerk teilnehmen und sich im Datenraum vernetzen können, muss eine offene und einfach implementierbare Softwarekomponente entstehen. Denn ohne den Mittelstand und die vielen KMU kann ein Wertschöpfungsnetzwerk nur einen Bruchteil des möglichen Mehrwerts liefern. Dies führt auch zu den aktuellen Herausforderungen und Fragestellungen: Stellt die Einführung von Datenräumen eine tragfähige Lösung dar, erreicht diese Idee die gewünschte Resonanz? Dies markiert einen entscheidenden Schritt im Kontext der 4. Industriellen Revolution.

Die Shared Production der SmartFactory^{KL}

Eine digitale Plattform oder ein dezentrales Produktionsnetzwerk, das automatisiert die Nachfrageseite (Auftraggeber) und die Angebotsseite (Auftragsfertiger) verbindet sowie resiliente Lieferketten schafft, hat das Potential, sowohl die Einkaufskosten für die Unternehmen zu senken, als auch die Auftragsverteilung bis auf die Maschinenebene zu optimieren. Dafür muss sich jedoch das Selbstverständnis der Fertigungsunternehmen hin zu einem Dienstleister entwickeln. In den letzten Jahren entstanden eine Vielzahl von Fertigungsplattformen für die Metallindustrie. In Deutschland sind dies beispielsweise Kreatize, Spanflug oder Proto Labs, in den USA sind Xometry und FAST RADIUS bekannt. Sie zeigen, dass die Shared Production kein akademisches Ziel aus dem Elfenbeinturm der Forschung ist. Allerdings fokussieren sich die Unternehmen aktuell stark auf die automatisierte Angebotserstellung. Eine durchgehende Vernetzung zwischen den Unternehmen und bis auf Maschinenebene existiert noch nicht. Dies ist jedoch die Voraussetzung, um die Lieferketten optimieren und kurzfristig umplanen zu können. Genau hier setzt die *SmartFactory*^{KL} an. Durch die automatisierte Einbindung externer Produktionskapazitäten und den Aufbau dynamischer Lieferketten über Fabrik-, Standort- und Unternehmensgrenzen hinweg, kann die Verteilung und Abwicklung von Aufträgen und deren Bearbeitung deutlich effizienter gestaltet werden. Die nahtlose Vernetzung von Produktionspartnern, Zulieferern und Endkunden in einem Wertschöpfungsnetzwerk für ein unternehmensübergreifendes Kapazitätsmanagement ist ein Ziel der Shared Production.

Für die Shared Production müssen Unternehmen vernetzt werden, ihre Dienstleistungen anbieten und miteinander kommunizieren können, um letztendlich eine Lieferkette zu bilden (Ebene 1). Sie müssen weiterhin in der Lage sein, Produktionsanfragen im Unternehmen bearbeiten und umsetzen zu können (Ebene 2). Dazu gehört die Angebotserstellung, die Arbeitsvorbereitung sowie die eigentliche Produktion und Logistik. Um die Shared Production in einer unternehmensübergreifenden Umgebung zu ermöglichen, sind eine herstellerunabhängige, standardisierte Struktur der Informationsmodelle für den Austausch maschinenlesbarer und interpretierbarer Daten, eine standardisierte Kommunikation für automatisierte Verhandlungen und Datenaustausch, sowie eine föderierte und sichere Dateninfrastruktur in Übereinstimmung mit den europäischen Gesetzen erforderlich. Hierbei stellt Gaia-X[3] einen Satz an weltweit geltenden Regeln und Spezifikationen bereit, welche von der sog. Governance (einer Art Autorität), in unserem Fall der *SmartFactory*^{KL}, genutzt werden kann und von der Infrastruktur (Hardware und Software) umgesetzt werden muss. Datenräume sind dabei Teil des Gaia-X-Ökosystems, entwickeln sich jedoch in domänenspezifischen Bereichen und haben

6 *Parkins M., Prasad M., Tiedemann H., 2021 In volatile markets, embedded product costs can be a hidden treasure, McKinsey & Company. Available at: https://www.mckinsey.com/business-func-tions/operations/our-insights/in-volatile-markets-embedded-product-costs-can-be-a-hidden-treasure*

einen zusätzlichen Anspruch an die geltenden Vorschriften und Marktvorschriften. In unserem Bereich ist diese Domäne der Fertigungsbereich mit Berücksichtigungen der neusten Entwicklungen im Rahmen Industrie 4.0 und PL4. In diesem Zuge ist für uns Gaia-X immer der zugrunde liegende Kern eines Datenraums. Und im nachfolgenden ist der Begriff des Datenraums immer als Teil innerhalb des Gaia-X-Ökosystems anzusehen. Eine schematische Darstellung zur Erstellung resilienter Lieferketten im Rahmen der Shared Production kann der nachfolgenden Abbildung 1 entnommen werden.

Durch »Federation Services« werden die Dienstleistungen der Unternehmen verfügbar gemacht, sowie der Informationsaustausch, Administration und Zugang ermöglicht. Für die Vernetzung der Unternehmen wird der Eclipse Dataspace Components (EDC) Konnektor[8] genutzt, der den Transport von Nachrichten mit Gaia-X-Kompatibilität umsetzt (siehe Kapitel 5). Der EDC-Konnektor stellt den Eintrittspunkt in unseren Datenraum dar. Um als vertrauensvolle Entität interagieren zu können, muss die Autorität des Ökosystems (Governance) jedoch die Compliance der Teilnehmer sicherstellen und eine Verifikation durchführen. Hierzu implementieren die Dataspace Services die Konzepte von Gaia-X und die »Federation Services«, um die Selbstbestimmtheit über die Daten und damit das Vertrauen zu sichern. Notwendige Kernfunktionalitäten sind beispielsweise Authentifizierungsfunktionen für die Teilnehmenden oder eine Registry, in der die Unternehmen ihre Dienstleistungen zur Verfügung stellen können. Der EDC-Konnektor ermöglicht bspw. einer Fertigungsplattform, ihren Service zur Erstellung von Lieferketten im Datenraum anzubieten. Auftraggeber und Auftragsfertiger können Daten innerhalb des Datenraums gemäß den entsprechenden Richtlinien und unter Berücksichtigung einer gemeinsamen Syntax freigeben und abrufen. Die Dienste des Ökosystems bieten vertrauens- und

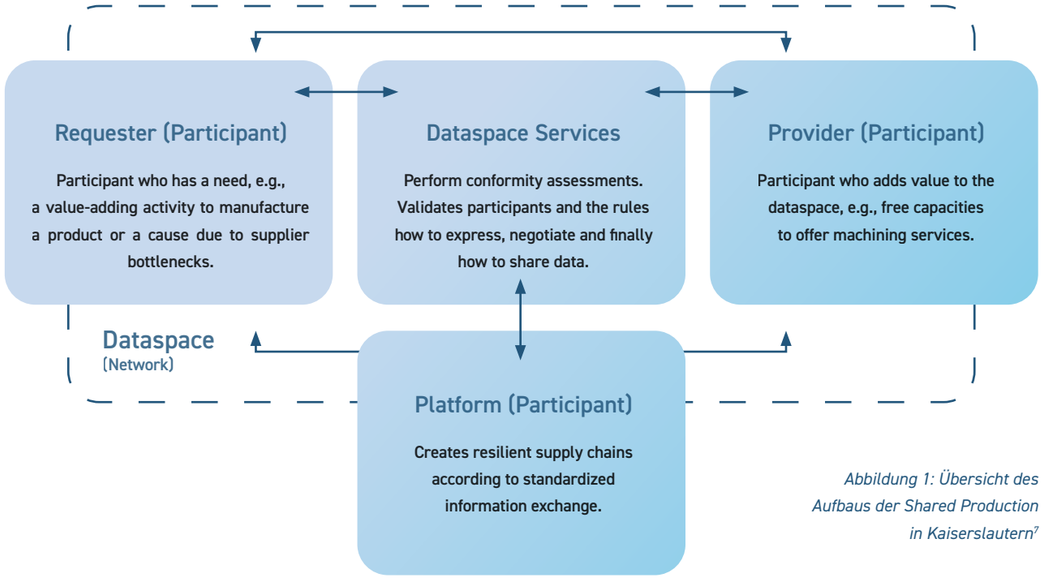


Abbildung 1: Übersicht des Aufbaus der Shared Production in Kaiserslautern[7]

7 S. Jungbluth, A. Witton, J. Hermann and M. Ruskowski, „Architecture for Shared Production Leveraging Asset Administration Shell and Gaia-X," 2023 IEEE 21st International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Lemgo, Germany, 2023, pp. 1-8, doi: 10.1109/INDIN51400.2023.10218150.
8 Eclipse Dataspace Componente stellen Software Framework bereit: https://projects.eclipse.org/projects/technology.edc

sicherheitsrelevante Funktionen, deren Mindestanforderungen durch die Gaia-X Federation Services definiert sind. Für den herstellerunabhängigen Austausch von Informationen wird eine digitale Repräsentanz, also eine standardisierte Struktur von Informationen, benötigt, die maschinenlesbar und interpretierbar ist. Hierbei liefert das Metamodell der Verwaltungsschale (VWS) die herstellunabhängige Struktur der Informationen (siehe Kapitel 4)[9].

Für die automatisierte Verarbeitung dieser Informationen müssen alle Teilnehmer des Produktionsnetzwerks dasselbe Verständnis über die Daten haben. Dafür müssen die angebotenen und benötigten Dienstleistungen durch technische und ökonomische Merkmale einheitlich semantisch beschrieben werden. Hierfür definiert das CSS-Modell (Capability, Skill & Service) die Dienstleistung als Beschreibung der kommerziellen Aspekte und die Art der Bereitstellung der angebotenen Capabilities eines Unternehmens (siehe Kapitel 5)[10].

Für die automatisierte Verhandlung von Dienstleistungen sowie den Datenaustausch zum aktuellen Stand der Produktion müssen sowohl die Nachrichtenstruktur als auch die Interaktionsmuster vereinheitlicht werden. Darunter fallen Struktur, Syntax und Reihenfolge der ausgetauschten Nachrichten. Hierfür wird die Richtlinie VDI/VDE 2193 genutzt, damit zwischen den Teilnehmern des Produktionsnetzwerks automatisiert ein rechtssicherer Vertrag abgeschlossen werden kann (siehe Kapitel 7)[11,12]. Eine wissenschaftliche Ausarbeitung des dargestellten Konzepts wird in unserer Veröffentlichung[7] erläutert.

Aufbau einer Produktionsinsel

Um im Shared Production-Szenario in den Rollen des Auftraggebers und Auftragsfertigers auftreten zu können, müssen die beteiligten Unternehmen autonome, intelligente und unabhängige Systeme repräsentieren. Dabei gibt die Literatur Aufschluss darüber, wodurch sich ein solches industrielles System auszeichnet. Müller et al.[13] nehmen dabei eine Klassifizierung nach vier Merkmalen vor:

1) **Systematische Prozessausführung:** Fähigkeit, modellierte Prozesse auszuführen.
2) **Anpassungsfähigkeit:** Fähigkeit eines Systems, seine Form oder sein Verhalten automatisch zu ändern, um seine Ziele zu erreichen, und zwar in Bezug auf Veränderungen in seiner Umgebung.
3) **Selbstverwaltung:** Fähigkeit eines Systems, die Systemressourcen ohne äußere Einmischung zu verwalten, um sie im Hinblick auf die Erreichung der vordefinierten Ziele des Systems zu nutzen, d. h. Ermöglichung der Eigenschaft der Anpassungsfähigkeit durch Verwaltungsaufgaben und Kontextwissen.
4) **Abgeschlossenheit:** Die Ziele und der Umfang des Systems werden präzise und ganzheitlich formuliert. Diese umfasst z. B. die Zeit oder den Zustand, in dem das System nicht auf menschliches Eingreifen angewiesen ist, eine Reihe von Dienstleistungen und Garantien.

9 IDTA: Asset Administration Shell Specifications. https://industrialdigitaltwin.org/content-hub/aasspecifications
10 Christian Diedrich et al.: Information Model for Capabilities, Skills & Services. Plattform Industrie 4.0 2022, https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Capabili
11 VDI/VDE 2193 Blatt 1: Sprache für I4.0-Komponenten - Struktur von Nachrichten
12 VDI/VDE 2193 Blatt 2: Sprache für I4.0-Komponenten - Interaktionsprotokoll für Ausschreibungsverfahren
13 Müller, Manuel, et al. „Industrial autonomous systems: a survey on definitions, characteristics and abilities." at-Automatisierungstechnik 69.1 (2021): 3-13.

Aus unserer Sicht ist die Anpassungsfähigkeit eine Schlüsselanforderung für Unternehmen, um dauerhaft wettbewerbsfähig zu bleiben. Dieses Prinzip spiegelt sich in der Natur wider, in der die Anpassbarkeit einen grundlegenden Schlüssel für die Evolution und Entwicklung von Arten darstellt. Unternehmen müssen auf unvorhersehbare Ereignisse reagieren, ihr Verhalten dynamisch anpassen und mit internen und externen Veränderungen zurechtkommen. 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[14], herstellunabhängig und interoperabel beschrieben werden, um eine übergreifende Kommunikation der OT und IT gemäß DIN SPEC 16593[15] zu ermöglichen. Dies wird realisiert, indem alle industriellen Assets und Dienste standardisierte Datenmodelle und Schnittstellen besitzen. Somit werden reale und virtuelle Strukturen resilient, indem ein nahtloser Austausch von Hardware- und Softwarekomponenten realisiert werden kann.

Hierzu existieren bestehende Interoperabilitätslösungen, welche in verschiedenen Lebenszyklusphasen verwendet werden können. Nach RAMI 4.0[16] empfehlen sich die drei Standards:

1) **AutomationML:** für die Asset-Entwicklung sowie die Planung des produktiven Einsatzes.
2) **OPC UA:** für den produktiven Einsatz sowie die Wartung des Assets.
3) **Verwaltungsschale:** für die Kommunikation der vernetzen Welt, zuzüglich aller Inhalte (wie Selbstbeschreibung, Product Carbon Footprint, Lebenszyklus etc.), die dem hergestellten Produkt zugeordnet werden können.

Dabei sei angemerkt, dass die vorgestellten Technologien nicht konkurrieren, sondern sich gegenseitig ergänzen und ein gemeinsames Zielbild formen[17]. Abbildung 2 zeigt die interne Struktur einer Produktionsinsel aus dem Ökosystem smartMA-X. Diese Architektur folgt dabei dem CSS-Model. In diesem Kontext beschreibt ein Service eine Produktionsdienstleistung und ist definiert als eine Beschreibung der kommerziellen Aspekte und Mittel der Bereitstellung der angebotenen Capability. Die Capability hingegen ist die implementierungsunabhängige Spezifikation einer Funktion in der industriellen Produktion zur Erzielung eines Effekts in der physischen oder virtuellen Welt. Der Skill wiederum ist die ausführbare Implementierung einer gekapselten (Automatisierungs-) Funktion, die durch eine Capability spezifiziert ist. Bei der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit liegt der Fokus auf der Standardisierung der Prozessschritte der Produkte und der Selbstbeschreibung von angebotenen Capabilities. Capabilities werden für das interne Workflow-Management genutzt und angebotene Services basieren auf den Capabilities eines Unternehmens.[10] Die Erläuterung der umgesetzten Technologien erfolgt nachfolgend vom Shopfloor bis zur vernetzten Welt, also Bottom-Up.

Um Ressourcen auf dem Shopfloor interoperabel und autonom gestalten zu können, kann OPC UA mit dem Skill-based Engineering kombiniert werden. OPC UA Companion Specifications definieren spezifische Informationsmodelle für definierte Anwendungsfälle (Roboter, Werkzeugmaschinen etc.)[18] und dienen für uns als Bibliotheken, um austauschbare herstellerunabhängige Ressourcen zu modellieren und die Informationen aus dem Shopfloor zugänglich zu machen (siehe Kapitel 6). Innerhalb der VWS wird der komplette Produktionslebenszyklus aggregiert, wobei auf existierenden Standards aufgesetzt wird. In der VWS sind statische und dynamische Informationen wie z.B. Typenschilder, angebotene Capabilities und Stücklisten gespeichert. Die Informationen werden in sog. domänenspezifische Submodelle (SM) untergliedert, welche von der Industrial Digital Twin Association[19] (IDTA) standardisiert werden. Somit dient die VWS als Lebenszyklusakte für Produkte, Ressourcen, Fabriken oder auch Softwarebausteine, als direkter Einstiegspunkt zu weiteren Schnittstellen (z.B. OPC UA mit den entsprechenden OPC UA Companion Specifications) und als Vokabular nach außen (siehe Kapitel 4). Als Schnittstelle zur Außenwelt bietet Gaia-X Spezifikationen und Vorgaben, welche den Austausch von Daten selbstbestimmt und souverän ermöglicht. Hierbei bietet der EDC-Konnektor eine mögliche technische Umsetzung und erlaubt den interoperablen Datenaustausch zwischen EDC-Konnektoren (siehe Kapitel 5). Durch den Einsatz von OPC UA, der VWS und dem EDC-Konnektor stehen nun Daten und Zugriffspunkt zur Verfügung. Es wird jedoch eine autonome Einheit benötigt, welche Zusammenhänge zwischen den Datenpunkten herstellen kann und die Produktionsziele in Anbetracht der übergeordneten Strategie verfolgt. Hierbei setzten wir auf autonome, intelligente Entitäten, welche als Holons (ein Holon ist ein Teil eines Ganzen, das wiederumTeil eines größeren Ganzen sein kann. Vereinfacht gesagt repräsentieren Holons ein System, welches aus unabhängigen Subsystemen besteht.) bezeichnet werden (siehe Kapitel 7). Holons werden über die VWS konfiguriert, verwalten Assets über ihren Lebenszyklus sowie repräsentieren den aktiven Teil eines Assets und realisieren somit die aktive I4.0-Komponente. Dabei untergliedern sich Holons nach ihren spezifischen Aufgaben in Produkt-Holons, Ressourcen-Holons und Service-Holons. Die nachfolgenden Kapitel stellen die genannten Konzepte im Detail vor und bieten anschauliche Beispiele, wie die vorliegende Architektur umgesetzt werden kann.

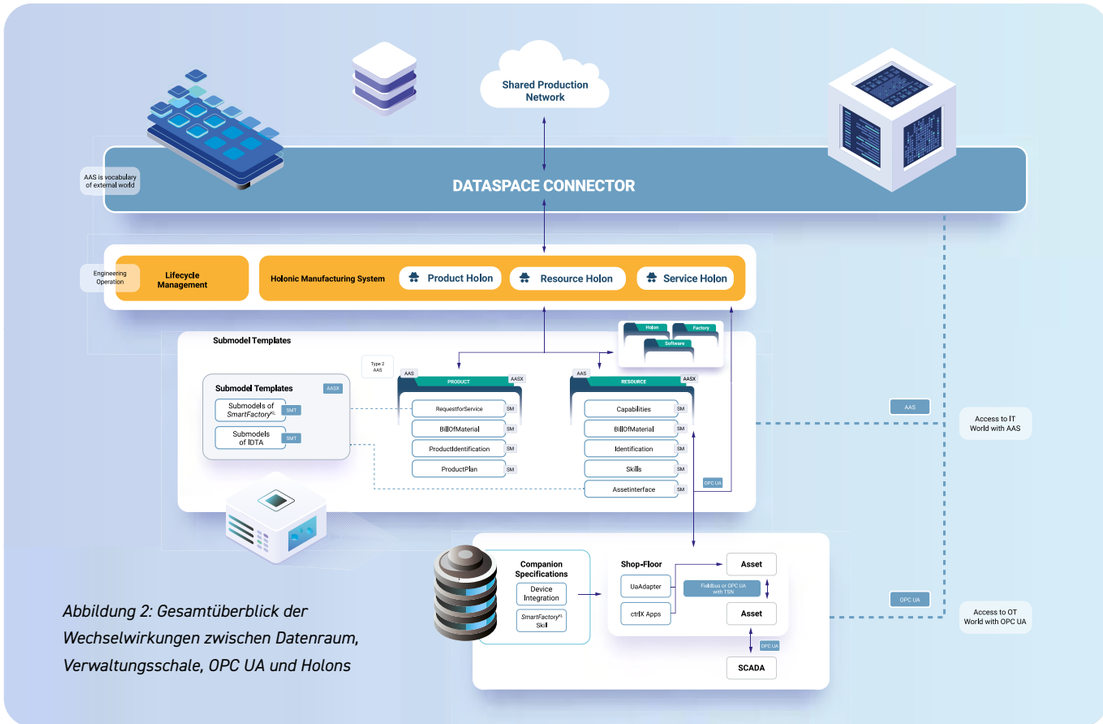


Abbildung 2: Gesamtüberblick der Wechselwirkungen zwischen Datenraum, Verwaltungsschale, OPC UA und Holons

14 Specification of the Asset Administration Shell – Part 1: Metamodel https://industrialdigitaltwin.org/wp-content/uploads/2023/06/IDTA-01001-3-0_SpecificationAssetAdministrationShell_Part1_Metamodel.pdf
15 DIN SPEC 16593: Reference Model for Industrie 4.0 Service architectures – Basic concepts of an Interaction-based architecture
16 Verwaltungsschale im Detail: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/verwaltungsschale-im-detail-pr%C3%A4sentation.pdf?__blob=publicationFile&v=1
17 Draht, Rainer et.al, Diskussionspapier – Interoperabilität mit der Verwaltungsschale, OPC UA und AutomationML
18 OPC UA Companion Specifications: https://github.com/OPCFoundation/UA-Nodeset
19 IDTA - Der Standard für den Digitalen Zwilling: https://industrialdigitaltwin.org/

03

Erleben Sie unser dynamisches Netzwerk von Demonstrationsprojekten im Ökosystem

Die Produktionswelt von morgen ist modular, vernetzt und datensouverän. Mit unserem Gaia-X-Ökosystem zeigen wir bereits jetzt, wie Unternehmen ihre Fertigung zukunftssicher aufstellen können. Im Testbed sind Cyber-Physische Produktionsmodule (CPPM) die Grundeinheit. CPPMs lassen sich zu Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPPS) oder in unserem Fall Produktionsinseln aggregieren. Eine Produktionsinsel kann wiederum Teil einer größeren Produktionsinsel sein. So entsteht eine flexible SmartFactory, die sich beliebig skalieren und erweitern lässt.

In diesem Kapitel stellen wir die Module unseres Testbeds und deren Funktionen detailliert vor. Durch die modulare Bauweise lassen sich die Komponenten bedarfsgerecht zur Gewährleistung der maximalen Effizienz bei voller Datensouveränität leicht kombinieren. Unser Demonstrator-Ökosystem zeigt anschaulich die Potentiale von Gaia-X für modulare, vernetzte und datensouveräne Produktion. Dank der föderierten und sicheren Datennutzung über Gaia-X können Partner über Unternehmensgrenzen hinweg sicher zusammenarbeiten und von den gemeinsamen Daten profitieren, ohne die Hoheit darüber abzugeben.[20]

In unserem verteilten Produktionsökosystem wird als Beispielprodukt ein Modell-LKW gefertigt. Der Prozess beginnt mit der Konfiguration des LKW. Im zweiten Schritt werden, falls vorhanden, Re-Use-Bauteile vorgeschlagen, die der Kunde wählen kann. Ist die Bestellung abgeschickt, beginnt die Produktion des LKW. Dafür stehen Produktionsmodule und Produktionsinseln zur Verfügung, die unterschiedliche Schritte der Fertigung vollautomatisch ausführen. Integriert sind aber auch Handarbeitsplätze und Logistikelemente.

Wird eine Bestellung ausgelöst, beginnen die Einzelelemente des Ökosystems mit der Produktionsorganisation. Beispielhaft finden Abstimmungen mittels Matching-Plattformen statt, an deren Ende der Produktionsplan steht. Während der Aushandlungsprozesse stellen die Services über die Verwaltungsschalen (VWS) jeweils detaillierte Informationen über den jeweiligen Fertigungsschritt zur Verfügung, wie bspw. die Produktionsdauer, die Kosten, den CO_2- oder den Energieverbrauch. So wird es perspektivisch möglich, die Produktion an Parameter zu koppeln, in denen z.B. auf besonders geringen Energieverbrauch Wert gelegt wird.

20 Es sei hierbei angemerkt, dass das vorgestellte Demonstrator Testbed der SmartFactory^{KL} aus den Synergien mehrerer Projekte entstanden ist.

Die Produktionsinsel_KUBA

Auf der Produktionsinsel_KUBA finden die wichtigsten Produktionsschritte des Modell-LKW statt. Hier finden Qualitätskontrolle, Montage (Handarbeit) sowie Ein- und Ausschleusung statt. Die Produktionsinsel_KUBA besteht aus drei CPPMs – dem Connector Module[21], dem Quality Control Module und dem Conveyor Module, sowie einer weiteren Produktionsinsel_SYLT[22], die einen 3D-Drucker, einen Roboter und eine Handmontage umfasst. _KUBA wird über ein Multi-Agenten-System (MAS) gesteuert (vgl. Kapitel 7). Abbildung 3 zeigt eine modellhafte Darstellung der Produktionsinsel_KUBA mit dem zentralen Transportsystem und den daran angedockten CPPMs. Die CPPMs können beliebig positioniert werden. Dadurch bietet die Produktionsinsel_KUBA, je nach angeschlossenen Modulen, verschiedene Dienstleistungen im Shared Production-Netzwerk an. Um einen sicheren Arbeitsbereich zu gewährleisten, sind die CPPMs mechanisch mit dem Transportsystem verriegelt. In diesem Zusammenhang bezeichnen wir zwei oder mehr mechanisch verbundene CPPMs als Nachbarn. Es existieren insgesamt fünf verschiedene Kopplungsstellen, an denen die CPPMs mittels Elektromagneten verriegelt werden können. Somit sind das Connector Module, das Quality Control Module und die Produktionsinsel_SYLT physisch mit dem Conveyor Module verbunden und bilden eine Nachbarschaft.

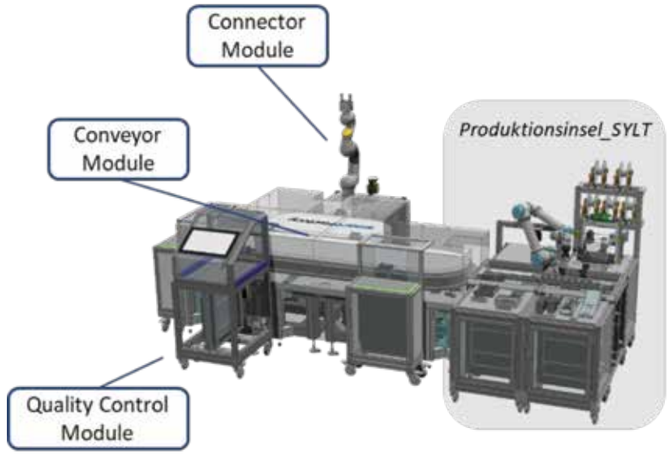


Abbildung 3: Demonstration der Produktionsinsel_KUBA

Beidseitig montierte sichere RFID-Sensoren ermöglichen den CPPMs, das jeweilige benachbarte Modul zu identifizieren. Dadurch können CPPMs Peer-to-Peer-Verbindungen aufbauen und komplexe Aufgaben gemeinsam lösen. Das Quality Control Module führt mit modernster KI-gestützter Bildverarbeitung eine zuverlässige Qualitätsprüfung der gefertigten Produkte durch. Dabei kommt Federated Learning[23] zum Einsatz. Die meisten KI-Methoden profitieren von einer großen Datenbasis. Obwohl heute schon viele Prozessdaten in der Produktion anfallen und gespeichert werden, ist das Teilen dieser Daten besonders über Unternehmensgrenzen hinweg ein großes Hemmnis (Betriebsgeheimnisse, Datenschutz usw.). Beim Federated Learning kann über Unternehmensgrenzen hinweg zusammengearbeitet werden, ohne die konkreten Daten zu teilen, denn es werden von allen Teilnehmern nur Modellparameter und keine Produktionsdaten übermittelt. Daraus wird ein Durchschnitt für den Lernprozess ermittelt und das Ergebnis steht allen Teilnehmern gleichberechtigt zur Verfügung, ohne dass echtes Wissen übertragen wurde. Das Conveyor Modul ist das hochflexible Transportsystem ACOPOStrak mit mehreren Shuttles. Es verbindet die einzelnen Produktionsmodule für einen optimierten Materialfluss. Die Shuttles werden bedarfsgerecht angefordert und navigieren eigenständig zum Zielpunkt. Das System ist modular aufgebaut, wobei einzelne Segmente zu einem flexiblen Design umgesetzt werden können.

Analog zur Hardware setzt auch die Software des Transportsystems auf Modularität. Die unterschiedlichen Shuttles lösen auf dem Schienensystem abhängig von ihrer Position Events aus, wodurch das Bewegungsmuster dynamisch verändert und ein reibungsloser Produktionsfluss gewährleistet wird. Shuttles können einfach eingesetzt oder entfernt werden, ohne die aktuelle Produktion nachhaltig zu stören. Entsprechend dem Skill-basierten Ansatz stellt der ACOPOStrak Skills bereit, die die Aufgabe des Transports kapseln. Mit diesen Skills kann automatisiert das passende Transportmittel gewählt und zur Zielposition navigiert werden. Die Systemarchitektur des Connector Moduls folgt einem Skill-basierten Konzept, wonach zusätzlich über 5G kommuniziert wird. Der darauf verwendete Roboterarm besitzt wesentliche Sicherheitsmerkmale eines Industrieroboters. Er wird zum Ein- und Ausschleusen von Bauteilen in und aus der Produktionsinsel_KUBA verwendet. Zur Kontrolle des Roboters und des Fertigungsmoduls wird ein drahtloses Handbediengerät verwendet. Nach dem Vorbild eines klassischen Teachpanels besitzt es, neben einer Touch-HMI, einen Notaus-Schalter, eine Zustimmeinrichtung und einen Betriebsartenwahlschalter. Durch die Verwendung des PROFIsafe-Protokolls für die Signale der Safety-Geräte wird die funktionale Sicherheit, trotz Funkübertragung via 5G, zum Fertigungsmodul sichergestellt.

Die Produktionsinsel_SYLT

Die Produktionsinsel_SYLT ist ein CPPS, das vor dem Hintergrund einer stark modularen und flexibel rekonfigurierbaren Fertigung entwickelt wurde. Es wird fortlaufend erweitert. Kernkonzept sind gekapselte Einheiten auf verschiedenen Ebenen mit eingebetteten Steuerungen und Skill-basierten Schnittstellen, welche zu komplexeren Einheiten aggregiert werden können. Die Modulkonfiguration besteht aus einem zentralen Logistikmodul sowie vier gekoppelten Submodulen mit verschiedenen Produktionsressourcen. Das Logistikmodul bietet einen Knickarmroboter und eine Linearachse, um einen universellen Materialtransport über alle Peripheriemodule zu gewährleisten. Darüber hinaus bietet das Modul eine standardisierte Dockingstelle, um das gesamte CPPS mit dem übergeordneten Logistiksystem (hier dem ACOPOStrak der Produktionsinsel_KUBA) kombinieren zu können. Hierbei steht besonders am Handarbeitsplatz die Interaktion von Mensch und Maschine im Vordergrund. Gemäß der Vision von *Production Level 4* bleibt der Mensch ein essenzieller Bestandteil der Produktion, was hiermit hervorgehoben werden soll.

21 Von der Europäischen Union aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung und dem Land Rheinland-Pfalz gefördert.
22 Das Projekt „DIMOFAC - Digital Intelligent MOdular FACtories" wurde von der Europäische Union aus dem „Horizon 2020" EU-Programm gefördert.
23 V. Hegiste, T. Legler and M. Ruskowski, „Application of Federated Machine Learning in Manufacturing," 2022 International Conference on Industry 4.0 Technology (I4Tech), Pune, India, 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/I4Tech55392.2022.9952385.

Die Produktionsinsel_JAVA

Auf _JAVA können zwei verschiedene Produkte gefertigt werden: So kann neben Teilen für den Modell-LKW auch ein USB-Stick gefertigt und mit Daten bespielt werden. Während auf den anderen Inseln eine dezentrale Steuerung über Multi-Agenten-Systeme stattfindet, wird _JAVA über einen zentralen Orchestrator[24] gesteuert. Er steuert die Skills der einzelnen CPPMs basierend auf dem Fertigungsrezept des zu montierenden Produktes an.

Auf _JAVA sind folgende CPPMs integriert:

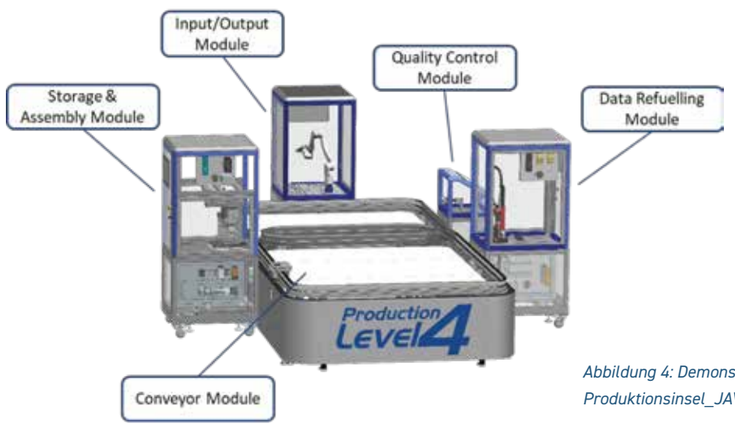


Abbildung 4: Demonstration der Produktionsinsel_JAVA

Das Storage & Assembly Module dient der flexiblen Zwischenlagerung und Endmontage des USB-Sticks. Es verfügt über Regale für die kommissionierte Bereitstellung von Teilen sowie Montageplätze für die Endfertigung. Das Data Refuelling Module ermöglicht die Personalisierung und Konfiguration der Produkte, indem es beispielsweise individualisierte Daten auf einen USB-Stick aufspielt. Diese können dabei an die Kundenwünsche angepasst werden. Das Quality Control Module passt die ausgewählten KI-Modelle automatisch dem Produkttyp an. Je nachdem, ob ein USB-Stick oder ein Modell-LKW geprüft wird, greift die KI auf das passende neuronale Netz zurück. Das Input/Output-Module dient als Schnittstelle für autonome mobile Roboter (AMR). Darüber können Teile der Insel zugeliefert und fertige oder fehlerhafte Teile aus der Insel ausgeschleust werden. Mehrere AMRs sorgen für Redundanz und Ausfallsicherheit.

_JAVA und _KUBA sind so konzipiert, dass ein Modultausch untereinander jederzeit möglich wird. So können die jeweiligen Produktionsinseln sowohl USB-Sticks als auch Modell-LKWs fertigen, abhängig davon, auf welche gekoppelten Module sie zurückgreifen können. Diese einmalige Flexibilität ist ein entscheidender Meilenstein auf dem Weg in die Produktion der Zukunft und war eine der wichtigsten Neuerungen der Idee von Industrie 4.0.

24 Ruskowski, Martin, et al. „Production bots für Production Level 4: Skill-basierte systeme für die produktion der zukunft." atp magazin 62.9 (2020): 62-71.

Erleben Sie unser dynamisches Netzwerk von Demonstrationsprojekten im Ökosystem

Die Produktionsinsel_MILOS

Die Produktionsinsel übernimmt in der Shared Production Kaiserslautern die Rolle des externen Zulieferers, der seine Fertigungsskills im Datenraum anbietet. Sie kommt bei bestimmten Konfigurationswünschen des Modell-LKW ins Spiel. Durch die Skill-basierte Fertigungslandschaft ist es möglich, im CAD konstruierte Bauteile ohne jegliche Erstellung von Fertigungsprogrammen (wie CAM, werkstattorientierte Programmierung, G-Code-Programmierung) zu fräsen. Die Skills der Roboterzelle, die als Fräsmaschine genutzt wird, kapseln sämtliche notwendigen Entscheidungen bzgl. Werkzeugweg, Anfahrstrategie, Werkzeugwahl, Bearbeitungsparameter etc.

Durch die Intelligenz der Maschine und die Kapselung der Skills ist es möglich, lediglich durch die Vorgabe der geometrischen und werkstofftechnischen Eigenschaften des Produkts den Fräsprozess auszuführen. Im CAD-Programm ist ein eigenentwickeltes Plug-In installiert, mit dessen Hilfe die Features und Eigenschaften des Produkts extrahiert werden können. Geht ein Auftrag ein – sei es vom internen Konstruktionsplatz, sei es von extern über das Datenökosystem – wird eine solche Feature-Extraktion ausgeführt. Über das Plug-In werden zunächst die einzelnen Maschinen im Maschinenpark angefragt, ob diese ein Produkt mit den vorhandenen Eigenschaften fertigen können. Die Maschinen prüfen ihrerseits die Anfrage und melden die Ergebnisse an das CAD-Plug-In zurück. Sollte das Produkt auf mindestens einer der Maschinen gemäß den Anforderungen fertigbar sein, kann der Bedienende die entsprechende Maschine auswählen und den Auftrag starten.

Der Forschungskontext dieser Produktionsinsel erstreckt sich zusätzlich auf die Betrachtung von fahrerlosen Transportsystemen, die Remote-Überwachung der Anlage sowie die Anwendung von 5G in der flexiblen Produktion.[25]

Abbildung 5: Demonstration der Produktionsinsel_MILOS

Die Produktionsinsel_CAPRI

Die Produktionsinsel_CAPRI bietet dem Nutzer eine Produktionsstätte für additive Fertigung. Sie stellt im Produktkomplex das Führerhaus des Modell-LKW her. Der 3D-Druckerpark bietet eine umfassende, webbasierte Steuerung an. Über ein Human Machine Interface (HMI) können Nutzer in verschiedene Rollen (Standardnutzer:in, Kund:in, Werker:in) eintauchen. Der/die Werker:in kann bspw. mehr Funktionen nutzen, wie über die HMI Lagerbestände des Filaments einsehen oder das Gesamtsystem und alle Drucker überwachen. Die Produktionsinsel_CAPRI besteht aus verschiedenen Schulungsdemonstratoren[26] und veranschaulicht auf einem niedrigschwelligen Level, wie KMU ihre Produktionsprozesse digitalisieren und (teil-)automatisieren können. Der Schulungsdemonstrator Print4PAUL ergänzt die Fertigungslandschaft der Shared Production Kaiserslautern um 3D-Druck-Services. Hier kommen Hobby 3D-Drucker mit dem FDM-Verfahren zum Einsatz, um auf einem einfach verständlichen und ungefährlichen Level einen additiven Fertigungsprozess darzustellen. Die Anbindung der 3D-Druck-Services erfolgt über EDC-Konnektoren, wodurch die 3D-Druck-Services modular in die Produktion integriert werden können. Innerhalb des Demonstrators werden die Aufträge nach den Anforderungen des Produkts (Farbe, Material) auf die verfügbaren 3D-Drucker verteilt. Während des Fertigungsprozesses wird der Energieverbrauch der 3D-Drucker kontinuierlich aufgenommen und im Energiemonitoring gespeichert, um diese Daten zum Beispiel in der Verwaltungsschale des Produktes zu speichern, aber auch um Energievorhersagen weiter zu verbessern.

Abbildung 6: Demonstration des Schulungsdemonstrators Print4PAUL

Sharing Economy 4 PAUL (SE4PAUL) war als Schulungsdemonstrator gedacht, der Assembly-as-a-Service anbietet. Im Demonstrator-Ökosystem bietet er über den EDC-Konnektor ein Führerhaus aus Noppensteinen als alternative zum 3D-gedruckten Führerhaus an. SE4PAUL leitet eine:n Werker:in durch den Produktionsprozess, in dem er oder sie den Anleitungsschritten der Werker-Assistenz folgen muss. Diese wird wahlweise auf einem Handy angezeigt oder in einer AR-Brille in das Sichtfeld projiziert.

25 Das Projekt „5G Kaiserslautern" wurde vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) im Rahmen der 5x5G-Strategie (Förderkennzeichen: VB5GFKAISE) gefördert.
26 Die Schulungsdemonstratoren des Mittelstand-Digital Zentrums Kaiserslautern wurden im Rahmen des durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projektes (Förderkennzeichen: 01MF21005A) erstellt.

Erleben Sie unser dynamisches Netzwerk von Demonstrationsprojekten im Ökosystem

Abbildung 7: Demonstration des Schulungsdemonstrators SE4PAUL

SE4PAUL soll zeigen, wie resiliente Produktion aussehen kann, wenn über Datenräume produziert wird. Das Führerhaus aus Noppensteinen ist mit dem Modell-LKW kompatibel und wäre durchaus eine Alternative, sollten die 3D-Drucker einmal sämtlich ausfallen.

Die Produktionsinsel_SKYE

Die Produktionsinsel_SKYE bewertet KI-gestützt Bauteile des Modell-LKW, um sie ggf. zur weiteren Nutzung (Re-Use) zur Verfügung zu stellen. Um dem Zielbild einer Kreislaufwirtschaft näher zu kommen und wertvolle Ressourcen einzusparen, besteht die Notwendigkeit, mehrere Lebensphasen von Produkten in das Wirtschafts- und Produktionssystem mit einzubeziehen. Die Produktionsinsel_SKYE[27] zeigt die KI-basierte Qualitätsprüfung eines gebrauchten Modell-LKWs mit anschließender Entscheidung über die weitere Nutzung der Komponenten. Es wird dargestellt, wie Re-Use-Service-Anbieter innerhalb eines Datenraums teilnehmen können. Für Kunden besteht bei der Bestellung eines neuen Modell-LKW die Möglichkeit, auf gebrauchte oder neue Komponenten zurückzugreifen. Sämtliche Produkte sind über Verwaltungsschalen identifizier- und ansprechbar. So können LKW-Bestellende problemlos auf gebrauchte Komponenten des Re-Use-Anbieters zurückgreifen und Material, Energie und CO_2 einsparen. Jedes wiederverwertbare Bauteil enthält einen Produktpass, welcher unter anderem Informationen über den aktuellen Zustand, den bisherigen Nutzungsverlauf und den CO_2-Fußabdruck enthält. Mit _SKYE soll gezeigt werden, wie mit Hilfe der Selbstbeschreibung des Produktes auf Basis der Verwaltungsschale entschieden werden kann, ob eine Wiederverwendung möglich ist.

Abbildung 8: Demonstration der Produktionsinsel_SKYE

27 Das Modul entsteht im Rahmen des Green-AI Hub Mittelstand.

04

Der Produktlebenszyklus mit Verwaltungsschale in der Praxis

In der Shared Production nimmt das Produkt mit seinem Digitalen Zwilling eine zentrale Funktion ein. Im Umfeld verteilter Produktionsmodule werden starre, vorkonfigurierte Produktionsabläufe aufgebrochen und durch flexible Fertigungsfolgen ersetzt. Die standardisierte Beschreibung des Produktes sowie der Datenaustausch über alle Lebenszyklusphasen und mit allen Stakeholdern ist eine zentrale Voraussetzung bei der Umsetzung der Produktion von morgen.

Vor dem Hintergrund nationaler und europäischer Initiativen zur Förderung von Kreislaufwirtschaft[28] und Nachhaltigkeit[29] in der Produktion kann die Einführung des Digitalen Produktpasses (DPP) als Teil des Digitalen Zwillings einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung dieser Ziele leisten.[30]

Der Digitale Produktpass

Die derzeitige europäische Produktionsindustrie ist zunehmend von instabilen Lieferketten, geopolitischen Abhängigkeiten und dem Verbrauch von Ressourcen, die über die natürliche Erholungspotenz hinausgehen, geprägt. Um den europäischen Produktionsstandort nachhaltig wettbewerbsfähig zu gestalten, hat der European Green Deal das Thema Kreislaufwirtschaft zum zentralen Ziel erklärt. Hierbei sollen Materialien so lange wie möglich genutzt und Abfall reduziert werden. Zusätzlich soll eine durchgängige digitale Beschreibung von Produkten über alle Lebensphasen hinweg erfolgen, um Kreislaufprozesse über Organisationsgrenzen hinweg zu ermöglichen.

Für bestimmte Batterien wird beispielsweise ab 2026 die Einführung eines Digitalen Produktpasses verpflichtend sein.[31] Andere Produkte folgen sukzessive, wodurch das Thema in allen Branchen zu einem zentralen Planungsziel des aktuellen Jahrzehnts wird. Der DPP ist ein Konzept zur lebenszyklusphasenübergreifenden Verwaltung produktspezifischer Daten. Er beinhaltet die standardisierte Erfassung von Informationen innerhalb jeder Phase sowie den einheitlichen Zugriff durch nachfolgende Akteure in der Wertschöpfungskette. Produktspezifische Daten wie Wartungsanleitungen, verwendete Materialien und deren Verbindungen, Zertifikate, Lieferketten und Logistikwege, Energieaufwände, Treibhausgasemissionen oder Entsorgungshinweise sind in diesem Zusammenhang von großer Bedeutung. Insbesondere Werkstoffdaten spielen eine entscheidende Rolle bei der Umsetzung geschlossener Materialkreisläufe. Dienstleister wie Entsorger oder Recycler können nach Abschluss der Nutzungsphase einfach und standardisiert auf die Produktdaten zugreifen und somit erheblich zur Reduzierung von Abfall beitragen. Im DPP können wertvolle oder potenziell gefährliche Substanzen hinterlegt werden, welche somit nicht durch aufwendige Verfahren identifiziert und extrahiert werden müssen. Für eine erfolgreiche Umsetzung des DPP-Ansatzes ist vor allem eine durchgängige und standardisierte Dateninfrastruktur erforderlich. Diese muss die Erstellung, Weitergabe und Auflösung von DPP-Instanzen ermöglichen und den verschiedenen Akteuren je nach Bedarf lesenden oder schreibenden Zugriff auf bestimmte Produktdaten gewähren.

Datenschutz und ein sicherer Informationsaustausch sind somit grundlegende Voraussetzungen und entsprechen der Idee sicherer Datenräume in der Shared Production. Cloud-basierte Lösungen können die Infrastruktur sinnvoll ergänzen und eine Verwaltung der DPPs mit weltweitem Zugang sicherstellen.

28 *Europäische Kommission, „Circluar Economy Action Plan", https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en*
29 *Europäische Kommission, „Der europäische Grüne Deal", https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de*
30 *BMUV, „Was ist ein digitaler Produktpass?", https://www.bmuv.de/faq/was-ist-ein-digitaler-produktpass*
31 *Rat der EU, „Council adopts new regulation on batteries and waste batteries", https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/07/10/council-adopts-new-regulation-on--batteries-and-waste-batteries/*

Durch die produktzentrierte Bündelung von Informationen sowie einen standardisierten Zugriff können zukünftig neue Geschäftsmodelle für die Produktoptimierung entstehen. Zum Beispiel kann eine iterative Analyse von Nutzungs- und Demontagedaten den Designprozess zukünftiger Produkte in Richtung eines nachhaltigen Designs beeinflussen. Auch Kunden können von der Transparenz des DPP profitieren, um zu erfahren, welche Lieferketten dem spezifischen Produkt zugrunde liegen und welche Auswirkungen dies bspw. auf Wasserökosysteme, natürliche Ressourcen oder Treibhausgasemissionen hat, um bewusstere Kaufentscheidungen zu treffen.[32,33,34]

Als Technologie zur Implementierung des DPP wird die VWS empfohlen. Die VWS stellt ein standardisiertes Informationsmodell sowie eine einheitliche Schnittstellenbeschreibung zur Verfügung, womit sie zwei wichtige Voraussetzungen für die Umsetzung des DPP erfüllt. Darüber hinaus wurde die VWS mit dem Anspruch entwickelt, Assets über ihren gesamten Lebenszyklus als zentraler Zugriffspunkt für Informationen zu begleiten. In diesem Beispiel wird die Anwendung der Produkt-VWS anhand eines Modell-LKWs veranschaulicht, mit besonderem Fokus auf der Umsetzung eines DPP. Je nach Sichtweise kann der DPP als Teilmenge der Produkt-VWS interpretiert werden, je nach Inhalt der verwendeten Teilmodelle.[17]

Modell-LKW als Beispielprodukt

Zur beispielhaften Umsetzung der Shared Production wurde ein einfaches Produkt entwickelt, welches repräsentativ für komplexere Produkte steht. Das Beispielprodukt sollte mehrere Kriterien erfüllen. Es muss flexibel gestaltbar sein und möglichst viele Fertigungs-, Handhabungs- und Montageprozesse abbilden können. Durch modulare Erweiterungen sollten so immer neue Services integriert werden können.

Die Hauptanforderungen an die Entwicklung des Produkts war die möglichst einfache und anschauliche Gestaltung, während gleichzeitig vermieden werden sollte, die Produktionsschritte zu sehr zu vereinfachen, um einen Bezug auf reale industrielle Fertigungsprozesse zu gewährleisten. Da das Prinzip der Klemmbausteine historisch bereits in Demonstratoren der *SmartFactory*[KL] verwendet wurde und das neue Produkt intuitiv individualisierbar und erweiterbar sein sollte, wurde hier das bekannte Noppenraster konsequent weitergeführt, um einen skalierbaren Modell-LKW zu entwickeln. So können auch externe Partner unkompliziert Teile des Produktes austauschen, ergänzen oder verändern, um neue Varianten zu erzeugen. Die Maße für 3D-gedruckte Bauteile (Material PLA) sind in der technischen Zeichnung (Abbildung 9) dargestellt. Weiterhin können durch den Baugruppenaufbau viele Szenarien der Montage, aber auch End-of-Life-Szenarien betrachtet werden. Letzteres umfasst zum Beispiel das Recycling additiv gefertigter Teile oder die Demontage und Wiederverwendung einzelner Baugruppen und -teile (siehe Produktionsinsel_SKYE).

Der Modell-LKW ist in Abbildung 10 als Explosionsdarstellung gezeigt und besteht aus zwei Unterbaugruppen. Der vordere Teil des LKW beinhaltet ein Fahrwerk (Chassis 1), ein Führerhaus (Cab) und einen Dachaufbau (Windshield). Der hintere Teil besteht aus einem weiteren Fahrwerk (Chassis 2) und einem Auflieger (Semitrailer). Die Fahrwerke sind in der gezeigte Konstellation Zukaufteile, das Führerhaus und der Dachaufbau 3D-gedruckte Bauteile und der Auflieger entweder 3D-gedruckt oder gefräst. Dabei ist die User-Story einfach. Ein Produktkonfigurator bietet dem Kunden Konfigurationsoptionen an, sodass jeder LKW individuell zusammengestellt werden kann. Passend zum modularen Aufbau der ausgewählten LKW-Variante werden anschließend digitale Repräsentationen auf Basis der VWS erstellt, die als Ausgangspunkt zum Finden von wertschöpfenden Services im Datenraum dienen. Somit dient auch das Produktdesign dem modularen Ansatz der Shared Production.

32 Maike Jansen, Tobias Meisen, Christiane Plociennik, Holger Berg, André Pomp, Waldemar Windholz: Stop Guessing in the Dark: Identified Requirements for Digital Product Passport Systems; 2023
33 Steffen Foldager Jensen, Jesper Hemdrup Kristensen, Sofie Adamsen, Andreas Christensen, Brian Vejrum Waehrens: Digital Product Passports for a Circular Economy: Data Needs for Product Life Cycle Decision-Making; 2023
34 Christiane Plociennik et al: Towards a Digital Lifecycle Passport for the Circular Economy; 2022

Der Produktlebenszyklus mit Verwaltungsschale in der Praxis

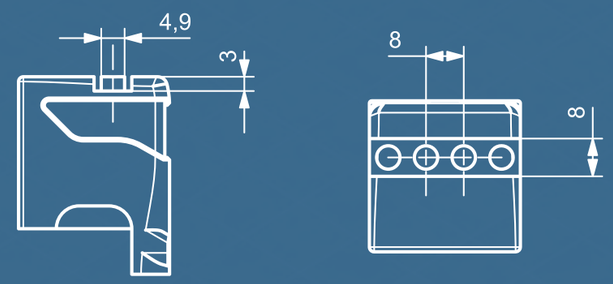


Abbildung 9: Maße für 3D gedruckte Noppen

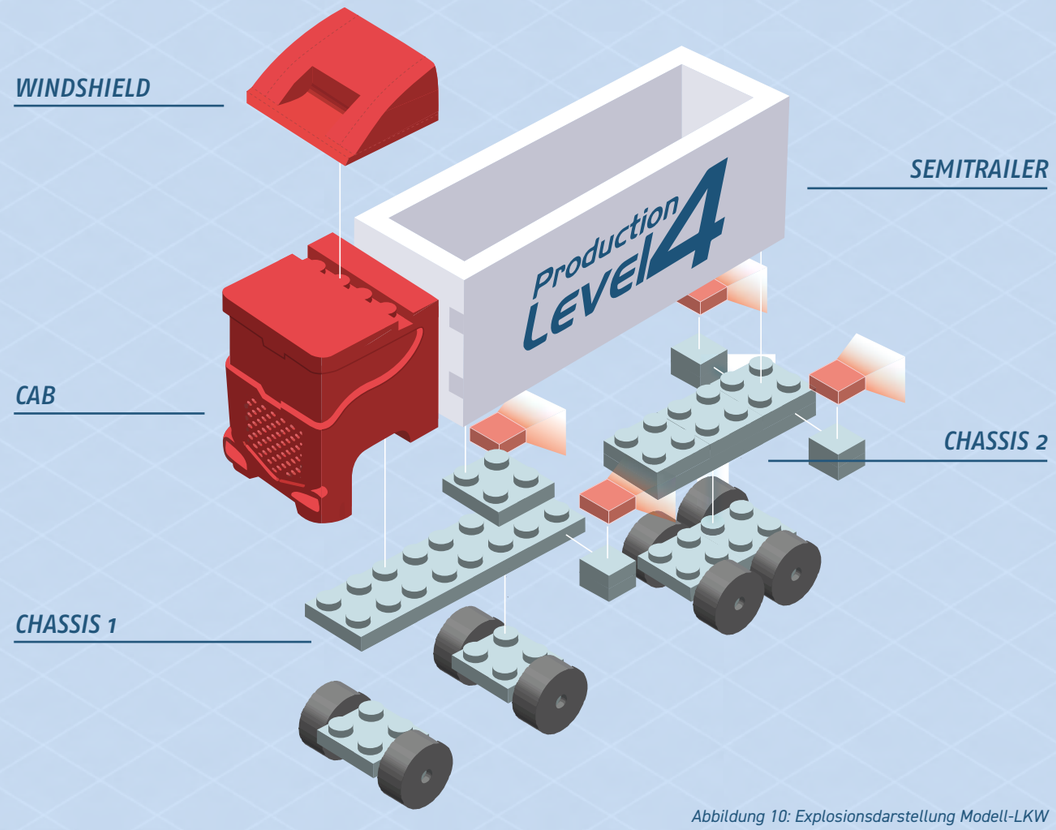


Abbildung 10: Explosionsdarstellung Modell-LKW

Nachdem der LKW konfiguriert wurde, wird der Produktionsauftrag angelegt. Die Designfeatures werden extrahiert und passende Services zur Herstellung werden im Shared Production-Ökosystem angefragt (siehe Kapitel 2). Die dabei extrahierten Features korrespondieren stets mit Produktionsmodulen, welche die benötigten Features über standardisierte Capabilities umsetzen können. Im Beispiel der verschiedenen Produktionsinseln der *SmartFactory*^{KL} werden der vordere und hintere Teil des Modell-LKWs getrennt voneinander gefertigt und am Ende verheiratet. Die Produkt-VWS dient parallel als DPP und sammelt Produktionsdaten. Die jeweilige Produktinstanz ist über die VWS eindeutig identifizierbar und verschiedene Stakeholder können lebenszyklusphasenübergreifend auf die Produktinformationen zugreifen. Im folgenden Abschnitt wird der konkrete Ansatz eines DPP auf Basis der VWS vorgestellt.

Verwaltungsschale als Digitaler Produktpass

In Abbildung 11 wird der DPP auf Basis der Produkt-VWS für einen Modell-LKW visualisiert.

Zugriffspunkt für die entsprechenden Informationen sind Teilmodelle der Produkt-VWS. In diesem Fall ein Teilmodell für den Energiebedarf und eines für Materialdaten. Diese beiden Aspekte wurden repräsentativ im Sinne einer nachhaltigen Produktion gewählt. Die Energiedaten aus der Produktion sind im Hinblick auf CO_2-Emissionen maßgeblich für die spätere Bilanzierung des Produkts.

Darüber hinaus kann so die Datengrundlage für nachgelagerte Services zur Prozessoptimierung und Ressourceneffizienz geliefert werden. Im Folgenden werden die einzelnen Teilmodelle erläutert, welche im Dashboard des DPP zu sehen sind.

Abbildung 11: Digitaler Produktpass Dashboard für einen Modell-LKW

// Energie-Teilmodell

Das Energie-Teilmodell des Modell-LKWs ist entsprechend der Produktbaugruppen strukturiert. Jedes Einzelbauteil durchläuft verschiedene Handhabungs- und Fertigungsschritte, welche durch Smartmeter in den Cyber-Physischen Produktionsmodulen (CPPM) überwacht werden können. Dadurch ist es möglich, den spezifischen Energiebedarf zu ermitteln. Der DPP fungiert als zentraler Knotenpunkt für die einzelnen Produktbestandteile, um am Ende eine Aggregation aller abgerufenen Energieformen zu gewährleisten. So kann ein spezifischer Gesamtwert des Energiebedarfs festgestellt werden. Im Gegensatz zum Modell-LKW, wo ausschließlich elektrische Energie betrachtet wird, können in der industriellen Praxis auch andere Energieformen wie hydraulische oder pneumatische Energie berücksichtigt werden. In Kombination mit weiterführendem Wissen über die Energieerzeugung kann das Energieteilmodell nicht nur zur Prozessoptimierung, sondern auch zur Berechnung von CO_2-Äquivalenten genutzt werden. Derzeit gibt es allerdings noch kein standardisiertes Teilmodell zur Abbildung dieser Energiewerte. Im Diskussionspapier „Verwaltungsschale in der Praxis“[35] wurde jedoch bereits im Jahr 2020 die Idee eines Energie-Effizienz-Teilmodells basierend auf ISO/IEC 20140-5 vorgestellt. Durch die Sichtweise eines DPP könnte dieses Teilmodell entsprechend ergänzt und standardisiert werden.

// Material-Teilmodell

Im Material-Teilmodell werden Werkstoffdaten und verwendete Mengen gespeichert. Vergleichbar zum Energie-Teilmodell wird auch hier eine Strukturierung auf Basis der Baugruppen gewählt. Ziel des Teilmodells ist es, möglichst jedes Einzelteil werkstofflich zu beschreiben. Beim Modell-LKW kann beispielsweise ein Recycling-Dienstleister nach einer Demontage sehen, dass das Führerhaus aus 13,6 g rotem PLA besteht, um nachfolgende Verwertungsschritte optimal planen und durchführen zu können. Durch die Ergänzung einer Material-VWS könnten weitere Werkstoffinformationen referenziert werden, wie zum Beispiel Schmelztemperatur für das Recycling oder eine Liste an Additiven, welche für das Recycling von Bedeutung sind. Für komplexe Produkte wird das Material-Teilmodell zusätzlich Informationen über die Verbindung von Komponenten enthalten. Die Auswertung der Nutzungs- und End-of-Life-Daten könnte beispielsweise ergeben, dass eine demontierbare Verbindung zur Trennung von unterschiedlichen Teilen sinnvoller ist als eine stoffliche Verbindung, wie z.B. Kleben. Dies kann in folgenden Designiterationen entsprechend angepasst werden. Standards in Hinblick auf End-of-Life-Prozesse existieren aktuell noch nicht, jedoch gibt es bereits Ansätze nach dem Beispiel des ZVEI, eine semantische Klassifikation von Werkstoffen im Kontext der Halbzeugbearbeitung vorzunehmen.[36]

// CO_2-Teilmodell

Um den Einfluss des Produkts auf die Umwelt transparent und vergleichbar darzustellen, eignet sich der CO_2-Fußabdruck. Dieser beinhaltet berechnete Äquivalentwerte auf Basis verschiedener Einflussfaktoren von Produktion, Transport oder Material. Je nach Berechnungsmethode kann ein Endwert zum direkten Vergleich mit anderen Produkten ermittelt werden. Bei einer transparenten Darstellung für Konsumenten könnte so ein Wettbewerbsvorteil für Produzenten entstehen. Dabei ist der Scope des CO_2-Fußabdrucks von

35 *Plattform Industrie 4.0, „Verwaltungsschale in der Praxis“, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industrie-4-0-verwaltungsschale-in-der-praxis.pdf?__blob=publicationFile&v=1*

36 *ZVEI, „Beispiele zur Verwaltungsschale der Industrie 4.0-Komponente - Basisteil“, https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2016/November/Beispiele_zur_Verwaltungsschale_der_Industrie_4.0-Komponente_-_Basisteil/Beispiele-Verwaltungsschale-Industrie-40-Komponente-White-Paper-Final.pdf*

Der Produktlebenszyklus mit Verwaltungsschale in der Praxis

entscheidender Bedeutung. Scope 1 beschreibt unmittelbar durch die Produktion entstandene Emissionen (z.B. durch einen Ofen im Werk) und Scope 2 solche, die durch externe Erzeugung elektrischer Energie anfallen (z.B. durch ein Gaskraftwerk). Diese beiden Aspekte können bereits sehr gut in der Praxis ermittelt und quantifiziert werden. Um den realen CO_2-Fußabdruck eines Produktes zu errechnen, sind jedoch vor allem Scope 3-Emissionen relevant. Dabei werden alle weiteren Einflüsse entlang der Wertschöpfungskette berücksichtigt, die unmittelbar mit dem Produkt zusammenhängen, jedoch nicht im Einflussbereich des Produktionswerks liegen (z.B. Emissionen durch den Rohstoffabbau). Scope 3-Emissionen berücksichtigen somit Scope 1 und 2 von anderen Unternehmen.

Ziel des DPP ist es, auch diese Einflussfaktoren zu erfassen, was Unternehmen aktuell noch vor große Herausforderungen stellt. Alle Emissionswerte sollen im CO_2-Teilmodell verfügbar sein, sodass jederzeit ein möglichst realistischer CO_2-Fußabdruck errechnet werden kann. Damit bietet der DPP auch die Möglichkeit, offizielle Zertifikate zu erstellen und in der Produkt-VWS zu hinterlegen, um die zukünftige Berichtspflicht zu erfüllen.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, wie am Beispiel des Modell-LKWs gezeigt wird, dass durch die standardisierte Datenschnittstelle des DPP in Form der VWS auch externe Servicedienstleister über die Datenräume auf alle relevanten Produktdaten zugreifen und eine zertifizierte Berechnung kommerziell anbieten können. Der Produzent behält die Datenhoheit des Produkts und teilt nur die relevanten Informationen über die VWS mit und erhält im Gegenzug das entsprechende Zertifikat. Zur standardisierten Darstellung des CO_2-Fußabdrucks in Bezug auf Produktion und Transport wurde das veröffentlichte Teilmodell der IDTA[37] verwendet und als verpflichtender Teil des LKW-DPP implementiert.

Am Beispiel des Modell-LKWs wird die zentrale Bedeutung der Produkt-VWS als DPP deutlich. Sie ist lebenszyklusübergreifend der Zugriffspunkt für produktspezifische Informationen. Abbildung 12 zeigt die Beziehungen zwischen DPP und Produktlebenszyklus. Ausgangspunkt ist die Produktentwicklung, wo Design und Funktion ausgeprägt werden, bzw. eine kundenindividuelle Konfiguration entsteht. Die entsprechenden Designfeatures sind die Basis für den Produktionsplan, welcher entsprechend den vorhandenen Ressourcen ausgeführt wird. An dieser Stelle werden Energie- und Materialdaten erhoben und in der VWS gespeichert. In der Nutzungsphase wird der DPP um Handhabungs- und Wartungsinformationen ergänzt. Am Ende des Produktlebenszyklus können verschiedene Strategien zum Wiederverwenden oder Recycling der Komponenten auf Basis des DPP den Materialkreislauf schließen. Komponenten, die entsorgt werden müssen, sind im DPP erfasst und mit Gefahren- oder Trennungshinweisen versehen, um den Prozess zu erleichtern. Der Designprozess kann von allen anderen Phasen durch Auswertung der Produktdaten profitieren. Durch Entwicklungsiterationen kann das Produktdesign optimiert werden. Die semantische Beschreibung der Produktdaten ermöglicht es, eine Informationsdurchgängigkeit über Unternehmensgrenzen hinweg zu schaffen.

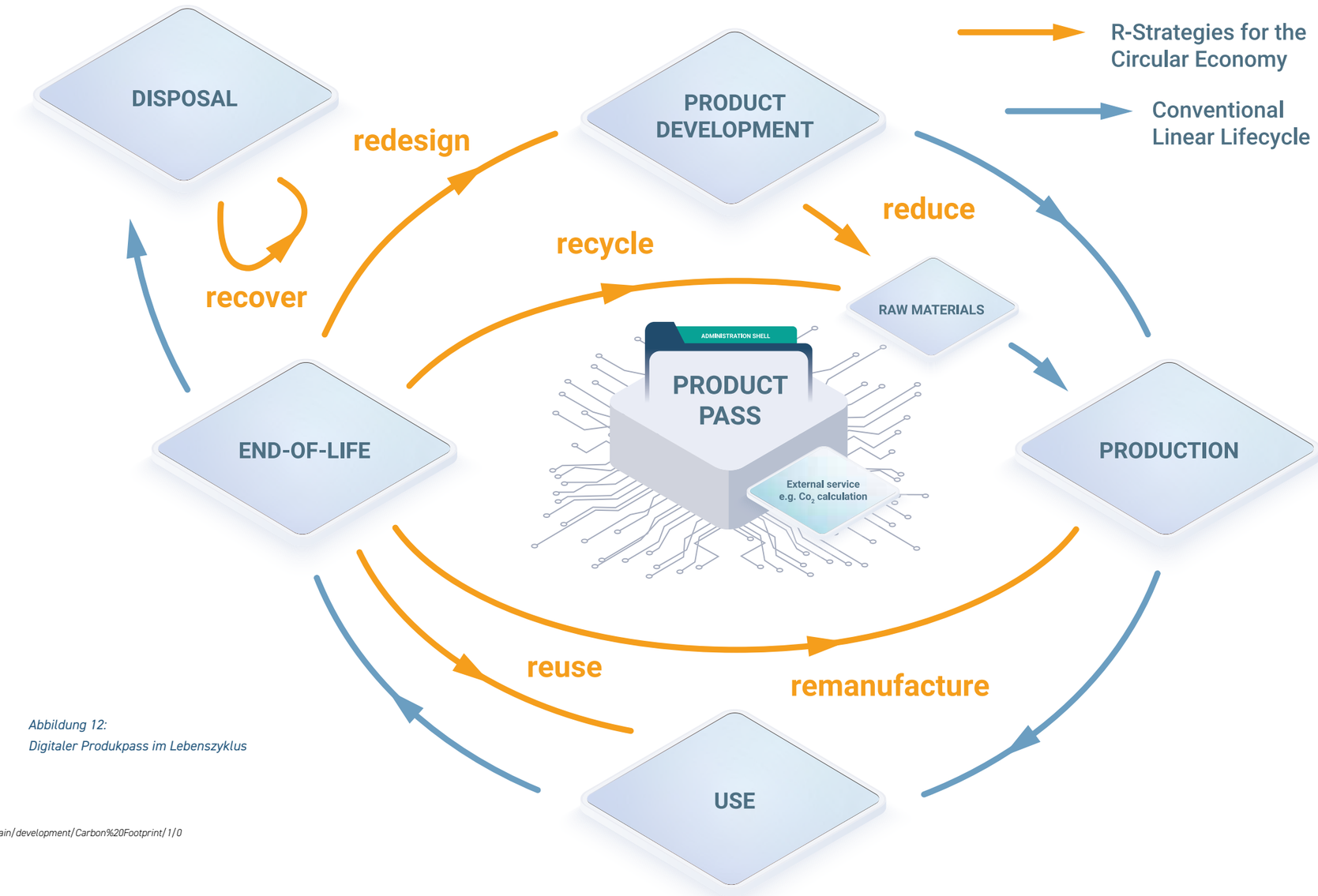


Abbildung 12:
Digitaler Produkpass im Lebenszyklus

37 IDTA, „Carbon Footprint (Version 1.0)", https://github.com/admin-shell-io/submodel-templates/tree/main/development/Carbon%20Footprint/1/0

05

Das smartMA-X-Ökosystem

Bei der engen Zusammenarbeit von Lieferanten in einem Wertschöpfungsnetzwerk umfasst der Datenaustausch hochsensible Daten aus der Produktion, deren sicherer Austausch gewährleistet sein muss. Hierzu ist eine standardisierte Kommunikation für automatisierte Verhandlungen und Datenaustausch sowie eine sichere Dateninfrastruktur erforderlich. Ein Ansatz zur Realisierung eines sicheren Rahmens wird durch Datenräume realisiert.

Ein Datenraum ist eine dezentrale, offene Infrastruktur, über die Teilnehmer digital zusammenkommen und Daten anbieten oder nutzen können.[38] Im Gegensatz zu zentralisierten oder monolithischen Systemen, bei denen die Datenspeicherung und -verwaltung über einzelne Dienste abgewickelt wird, setzt Gaia-X[3] auf Datensouveränität, bei der ein Erzeuger sämtliche Zugriffsrechte selbst verwaltet. Der Erzeuger von Daten kann festlegen, wo diese gespeichert werden und wer unter welchen Bedingungen darauf zugreifen darf. Die Gaia-X Association bietet Spezifikationen für die Bildung von Ökosystemen an, damit die Prinzipien Datensouveränität, Vertrauen, Sicherheit und Interoperabilität gewährleistet sind.

Das Gaia-X-Framework[39] basiert dabei auf drei grundlegenden Säulen:

+ **Gaia-X Compliance:** Dezentralisierte Dienste, die objektives und messbares Vertrauen ermöglichen
+ **Federation/Data Spaces:** Interoperable & portable (sektorübergreifende) Datensätze und Services
+ **Data Exchange:** Verankerte Vertragsregeln für Zugang und Datennutzung

Die Teilnahme an Gaia-X setzt dabei nicht den Einsatz spezieller Software voraus. Die Teilnahme wird jedoch nur ermöglicht, wenn die eigene Software mit den Kommunikationsstandards der Gaia-X-Spezifikationen kompatibel ist. Entsprechend des Gaia-X Modells[40] sind Datenräume Bestandteil des Gaia-X-Ökosystems, denen im Kern die Gaia-X-Spezifikationen zu Grunde liegen. Dabei definiert die Governance (Autorität) die Regeln, auf die sich die Teilnehmer geeinigt haben, welche wiederum in Form der Federation Services umgesetzt werden. In diesem Zusammenhang haben unterschiedliche Domänen bereichspezifische Anforderungen. Datenräume können die Gaia-X-Spezifikationen erweitern, um ihre eigenen spezifischen Validierungsdienste zu standardisieren.

Am Ende sind die Federation Services die Services, die für die Infrastruktur und den Datenaustausch notwendig sind, darunter sind zum Beispiel Services für die Synchronisierung von Katalogen, Zugangsmanagement oder Datenaustauschservices. In unserem Kontext sind somit Datenräume immer mit dem Gaia-X-Framework und der Infrastruktur von Gaia-X verknüpft, entstehen jedoch interessenspezifisch aus unterschiedlichen Domänen.

Um die Vertrauenswürdigkeit der Teilnehmenden in einem Datenraum sicherzustellen, ist ein Identifikationsmechanismus und eine entsprechende Validierung erforderlich. Dies gewährleistet, dass die Teilnehmenden tatsächlich diejenigen sind, für die sie sich ausgeben. In einem dezentralen Gaia-X-Ökosystem wird das durch das Prinzip der Self-Sovereign Identity (SSI) erreicht.[41] Durch SSI verfügen Teilnehmende über ihre eigenen digitalen Identitäten. Ein Cloud-Service-Provider oder ein zentraler Gaia-X-Identitätsprovider sind nicht notwendig, um die Teilnehmenden zu identifizieren. SSI nutzt die W3C Spezifikation Decentralized Identifier (DID), um einzigartige Identifikatoren zu erzeugen, sowie Verifiable Credentials (VC) und Verifiable Presentations (VP) für einen standardisierten und kryptografisch sicheren Austausch von Daten und Identitäten. Hierbei kann jeder Teilnehmende eine Selbstbeschreibung verfassen, in der unter anderem Kommunikationsendpunkte beschrieben werden. Dabei haben Teilnehmende ihren eigenen Credential Store (eine Art Wallet) zur Aufbewahrung ihrer Selbstbeschreibungen. Diese Selbstbeschreibungen beinhalten sog. Claims, welche von speziellen Organisationen verifiziert werden. Dazu gehören zuständige Zertifizierungsstellen, welche Gaia-X Labels ausstellen.

Ein Teilnehmender kann dabei verschiedene Rollen einnehmen, die als Federator, Consumer und Provider beschrieben werden.[42] Consumer und Provider sind die zentralen Rollen, die in einer Beziehung zwischen zwei Unternehmen angenommen werden. Hierbei stellt der Provider einen Service innerhalb des Datenraums zur Verfügung, während der Consumer Serviceangebote sucht und Serviceinstanzen nutzt. Federatoren sind von der Governance designiert, die Federation Services zu betreiben und können selbstständig entscheiden, Services zu betreiben oder anzubieten. Dies ermöglicht den Datenaustausch, indem sie z. B. vertrauenswürdige Identitäten oder andere unterstützende Dienste wie einen Servicekatalog bereitstellen.

Anforderungen zur Erstellung dynamischer Lieferketten

Für das Shared Production-Szenario innerhalb des *SmartFactory*^{KL}-Ökosystems werden nachfolgend die Anforderungen definiert. Diese müssen für die Realisierung des Konzeptes Shared Production erfüllt werden. In diesem Szenario wird angenommen, dass alle Teilnehmenden bereits zertifizierte und vertrauenswürdige Partner sind, welche innerhalb des Datenraumes interagieren dürfen. Der Eintrittspunkt ist die Anfrage von Produktionsservices und der Endpunkt ist die Sicherstellung der Erbringung des entsprechenden Services. Eine Auflistung aller Anforderungen ist Tabelle 1 zu entnehmen.

R6–R12 sind die Anforderungen, welche den Datenraum betreffen und die Übereinstimmung mit den Konzepten von Gaia-X sicherstellen. Das beinhaltet die Identifizierbarkeit aller Teilnehmenden (R6) sowie Registrierung (R7) und Autorisierung (R8) durch die Dataspace Authority. Zusätzlich dazu sollte jeder Teilnehmer mittels eines einfachen Dienstes am Datenraum teilnehmen können, um

38 *Building a Dataspace: https://www.gaia-x.at/wp-content/uploads/2023/04/WhitepaperGaiaX.pdf*
39 *Gaia-X Framework: https://docs.gaia-x.eu/framework/*
40 *Gaia-X Konzeptmodell: https://docs.gaia-x.eu/technical-committee/architecture-document/latest/gx_conceptual_model/*
41 *Gaia-X secure and trustworthy ecosystems with Self Sovereign Identity : https://gaia-x.eu/wp-content/uploads/2022/06/SSI_White_Paper_Design_Final_EN.pdf*
42 *Gaia-X Component Details : https://docs.gaia-x.eu/technical-committee/architecture-document/23.10/component_details/*

R1	Sicherstellen der Verifikation von Partnern, Datensouveränität, Einhaltung von Verhaltensregeln und gültigen Gesetzen.
R2	Effiziente Zusammenarbeit anhand präziser Regeln und angemessener Anzahl an Nachrichten.
R3	Nachvollziehbare Entscheidungsfindung bei Angebotserstellung und Beurteilung von Lieferketten.
R4	Gemeinsamer Sprachsyntax durch interoperables und semantisch beschriebenes Datenformat. Das datenraumentsprechende, domänenspezifische Wissen sollte in Templates zur Verfügung stehen. Dazu gehören das Serviceangebot des Anbieters (Provider), die Bedürfnisse des Auftraggebers (Consumer) mit den Ausschreibungskriterien, das Angebot und die Selbstbeschreibung der Entitäten.
R5	Der Datenraum muss erweiterbar und offen für neue Teilnehmende sein.
R6	Identifikation der Teilnehmenden.
R7	Registrierung der Teilnehmenden.
R8	Autorisierung der Teilnehmenden durch Dataspace Authority/Governance.
R9	Es muss eine Softwarekomponente existieren, welche den standardisierten Informationsaustausch innerhalb des Datenraums ermöglicht. Dabei müssen Daten mit Richtlinien und Regeln versehen werden können, um Datenhoheit zu gewährleisten. Die Softwarekomponente sollte dabei sofort und ohne große Konfiguration einsatzbereit sein.
R10	Grundlegende Funktionalitäten, wie Hochladen und Anbieten von Daten, stehen zur Verfügung.
R11	Ein Mechanismus zum Durchsuchen und Erkunden potenzieller Anbieter (Provider), Services und Datensätze ist vorhanden.
R12	Funktionalität für sicheren Datentransfer, initiierbar sowohl durch Anbieter (Provider) als auch den Auftraggeber (Consumer).
R13	Sicherstellen der Kompatibilität von benötigter und angebotener Beschreibung durch Matchingservice.
R14	Service in Verbindung mit R11 und R13, welcher die Lieferkettengenerierung kapselt.
R15	Dienstleistungserbringung muss nachweisbar sein. Dem Auftraggeber muss den Zugang zu den benötigten Daten ermöglicht werden. Hierbei muss die Datensouveränität berücksichtigt werden.
R16	Anforderungen müssen einem modularen Ansatz folgen, um eine erleichterte Anpassung und den Austausch von Konzepten zu gewährleisten.

Tabelle 1: Anforderungen für Shared Production Szenario[7]

so standardisierten Informationsaustausch und die Gewährleistung der Datensouveränität durch die Implementierung von klaren Regeln und Richtlinien zu ermöglichen (R9). Dabei müssen grundlegende Funktionalitäten wie das Hochladen und Freigeben von Datensätzen zur Verfügung stehen (R10). Auf der Grundlage dieser Daten muss es einen Mechanismus geben, der das Durchsuchen und Erkunden potenzieller Anbieter und Datensätze ermöglicht (R11). Dazu gehören Funktionen zur Datenübertragung, welche sowohl durch den Nachfragenden (Übergabe einer Serviceanfrage) als auch durch den Anbietenden (Abfrage der Daten des Nachfragenden) initiiert werden können (R12).

Für eine funktionsfähige Shared Production hat der Datenraum und die Anbindung der beteiligten Unternehmen eine Schlüsselfunktion. Daher wird in den folgenden zwei Unterkapiteln beschrieben, wie der Federated Service Catalogue aufgebaut ist und eine Anbindung mithilfe des sogenannten Konnektors[43] realisiert werden kann.

Komponenten des Datenraums

Anknüpfend an die bisher vorgestellten Konzepte sind eine Vielzahl von Komponenten notwendig, um einen Datenraum zu betreiben. Die Eclipse Dataspace Components (EDC) repräsentieren ein umfassendes Framework, das eine Reihe grundlegender (funktionaler und nicht-funktionaler) Merkmale bereitstellt. Es stützt sich auf die Spezifikationen des Gaia-X AISBL Trust Framework und des Dataspace-Protokolls der International Data Spaces Association (IDSA).[8, 44] Zu den notwendigen Komponenten gehören:

43 *Es sei angemerkt, dass Gaia-X im Allgemeinen keine spezifische Softwarekomponente wie einen Konnektor benötigt. Die Prinzipien werden auf Basis des Open-Source-Systems der Eclipse Dataspace Components im Nachfolgenden veranschaulicht.*

- **Connector**
- **Federated Catalogue**
- **Identity Hub**
- **Registration Service**
- **Data Dashboard**

Die vorliegenden Implementierungen orientieren sich aktuell an dieser in Open Source bereitgestellten Softwarebibliothek.

Der Konnektor

Der EDC-Konnektor stellt die Kernkomponente des Frameworks dar. Über diese Komponente erfolgt der Eintritt in den Datenraum und der unternehmensübergreifende Datenaustausch. Deshalb ist es wichtig, dass die Aspekte Datensouveränität, Zertifizierung aller Beteiligten sowie Interoperabilität über diese Komponente sichergestellt werden.

Der EDC-Konnektor basiert auf den Standards der IDSA[44] und greift auf die Standards von Gaia-X zurück. Der Konnektor besteht in seiner Grundstruktur aus einem minimalen Kern-Modul, welches um eine Vielzahl von Extensions erweitert wird. Diese Struktur ermöglicht sehr feingranulare Anpassungen, ohne dabei in bestehende Strukturen eingreifen zu müssen. Durch die daraus resultierende Erweiterbarkeit des Konnektors wird eine weitreichende Nutzbarkeit und Interoperabilität sichergestellt. Entsprechend Abbildung 13 kann der interne Mechanismus zum Datenaustausch können in zwei Ebenen unterteilt werden: die Datenebene (Data Plane) und die Kontrollebene (Control Plane). Die Datenebene realisiert das Senden oder Streamen von Daten. Die Kontrollebene regelt den Zugang, das Richtlinienmanagement, die Vertragsverhandlungen und die Vereinbarungen.

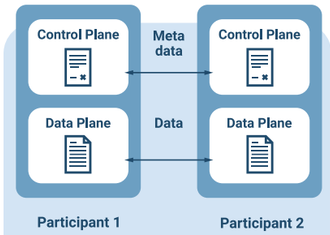


Abbildung 13: Datenaustausch zwischen zwei Eclipse Dataspace Components Konnektoren mit Daten-Kontrollebene[45]

// Einrichten eines Datenraums mit Eclipse Dataspace Components

Um einen Datenraum mit den EDC aufzubauen, wird eine oder mehrere Dataspace Authorities benötigt. Diese etablieren die Teilnahmebedingungen, gegebenenfalls durch Drittgutachterorganisationen, einen Satz von gemeinsamen Richtlinien, sowie ein Trust-Model. Die Dataspace Authority definiert einen Registrierungsprozess, über den Unternehmen die Mitgliedschaft beantragen können. Die Bewerbung wird durch eine Prüforganisation oder ein automatisiertes Regelwerk zertifiziert. Mit der Verifikation werden neue Unternehmen Teilnehmer des Datenraums und es wird ein Eintrag im Dataspace Member Registry hinzugefügt. Um Daten und Teilnehmende im Datenraum sehen zu können, wird der Federated Catalogue eingesetzt. Der Federated Catalogue ist eine EDC-Extension, welche periodisch die bereitgestellten Daten bereits validierter Datenraum-Teilnehmende sammelt und für einen schnellen Zugriff im EDC-Konnektor ablegt.

Der EDC-Konnektor ermöglicht ebenfalls das Ankoppeln von Erweiterungen, um benutzerdefinierte Funktionalitäten zu implementieren, wobei die Kommunikationsstandards bewahrt werden. Eine beispielhafte Implementierung eines solchen Datenraums mit der minimalen Anzahl an Funktionalität und Komponenten wurde als Referenzprojekt mit dem Namen Minimal Viable Dataspace[46] (MVD) bereitgestellt. Dabei handelt es sich um einen Datenraum auf Basis der EDC. Der MVD soll die Fähigkeiten der EDC darstellen und ist als Demonstration für die Implementierung eines benutzerdefinierten Datenraums anzusehen. Zudem wird dadurch Entwickelnden und Anwendenden die Möglichkeit geboten, den aktuellen Fortschritt der EDC und deren Funktionalität

44 *Neben der Initiative Gaia-X existiert die International Data Spaces Association (IDSA), die eine erste Referenzarchitektur für den souveränen Datenaustausch etabliert hat. Die IDSA stellt ein umfassendes Datenraumprotokoll zur Verfügung, welches vom Eclipse Dataspace Components Konnektor genutzt wird.*
45 *Nach: https://github.com/eclipse-edc/Publications/blob/main/Dataspaces/Dataspaces%20Vocabulary%20and%20Operations.md*
46 *Minimum Viable Dataspace: https://github.com/eclipse-edc/MinimumViableDataspace*

im Hinblick auf einen voll einsatzfähigen Datenraum abzuschätzen.

// Der Eintritt in den Datenraum

Der erste Schritt zum Eintritt eines Teilnehmenden in einen Datenraum ist die Bewerbung bei der Dataspace Authority. Dazu wird in der Regel eine Anfrage direkt an die Authority gerichtet, woraufhin diese das DID-Dokument des Teilnehmenden über eine vereinbarte DID-Methode (z.B. did:web) einholt. In diesem Dokument sind Daten zur Konnektivität sowie Schlüssel und Methoden zur Verifizierung der Anfrage enthalten. Zusätzlich kann eine Selbstbeschreibung für die Bewerbung herangezogen werden. Nach erfolgreicher Prüfung der Anfrage wird dem Teilnehmenden ein Verifiable Credential ausgestellt, welches belegt, dass der Teilnehmende Mitglied des von der Authority betreuten Datenraums ist. Somit kann der Teilnehmende auf den Federated Catalogue zugreifen und in einen gesicherten Datenaustausch mit anderen Datenraum-Teilnehmenden treten (siehe Abbildung 14).

Abgrenzung zum Minimal Viable Dataspace

// Komponenten

Unser Datenraum orientiert sich am Aufbau des MVD, modifiziert aber einige Aspekte, um unseren Anforderungen besser gerecht zu werden. Dabei bleiben die grundlegenden Rollen im Datenraum erhalten. Die Funktionsweise und Verantwortlichkeiten ändern sich dabei aber. Die Rolle des Registrierungsservice wurde etwas verschlankt. Dabei werden nun nicht mehr die DID-Dokumente der einzelnen Teilnehmenden über diesen zentralen Service gespeichert, um zukünftige Validierungen abzuschließen. Die DID-Dokumente werden in unserem Datenraum von den Konnektoren selbst verwaltet und bereitgestellt, was die Ideale von Dezentralität und Souveränität mehr unterstreichen soll. Anstatt über den Registrierungsservice als Mittelsmann zu gehen, ermöglicht diese Änderung einen direkteren Austausch von Partnern im Datenraum, auch bei der Erstellung des Federated Catalogues.

// Federated Catalogue

Unsere Vision eines Datenraumes ist eng mit unserem Vorhaben verbunden, Produzierende und deren Dienstleistungen mit Kunden zusammenzubringen. Dafür nutzen wir das bereits existierende Datenformat von Assets im Datenraum. Ein Asset eines EDC-Konnektors ist wie eine Hülle für die eigentlichen Daten. Es enthält beschreibende Informationen zu den eigentlichen Daten, die an dieses Asset geknüpft sind. Um unser Vorhaben zu verwirklichen, wurde die Asset-Datenstruktur genutzt, um klare Beschreibungen und Schlagwörter für Dienstleistungen darin abzuspeichern. Da diese Informationen im Federated Catalogue einsehbar sind, kann so effizient und präzise nach gewünschten Dienstleistungen gesucht werden. Unsere modifizierten Assets wandeln den üblichen Federated Catalogue in unseren Federated Service Catalogue um.

Abbildung 14: Komponenten des Datenraums
Quelle EDC-Logo: https://github.com/eclipse-edc

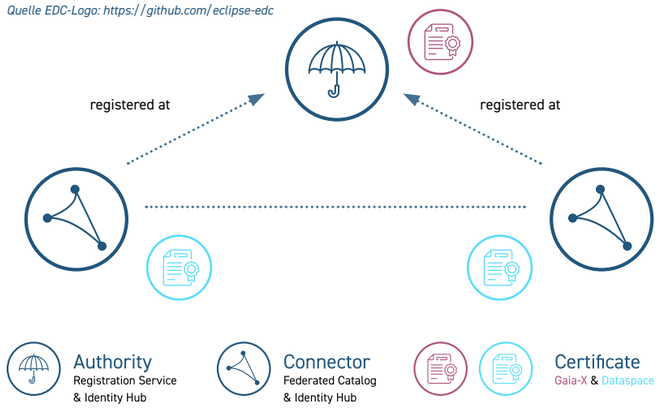


Abbildung 15: Federated Sevice Catalogue der SmartFactory^{KL}

Federated Service Catalogue

Im vorherigen Abschnitt wurde beschrieben, was ein Federated Service Catalogue ist und wie dieser mit den EDC in Zusammenhang steht. Im Folgenden wird darauf eingegangen, wie innerhalb des Katalogs die Repräsentierung der Daten aussehen kann. In einem Produktionsnetzwerk kann ein Unternehmen verschiedene Dienstleistungen anbieten, darunter Fertigungsdienstleistungen, die als Manufacturing-as-a-Service (MaaS) bekannt sind, oder auch Software-Dienstleistungen wie KI-basierte Analysen (AI-as-a-Service). Um diese Services auf einer Plattform wie dem Federated Service Catalogue anbieten zu können, müssen diese in einer standardisierten Form verfasst werden. Auf Basis des CSS-Modells und dessen technologiespezifischer Umsetzung durch die VWS wird diese Standardisierung erreicht. In den folgenden Abschnitten wird daher die Beschreibung der Dienstleistung aus der Perspektive des Anbietenden (Unternehmensseite) und des Anfragenden (Produktseite) betrachtet. Im Detail werden dafür die angebotenen Services der fünf Produktionsinseln vorgestellt sowie die entscheidenden Teilmodelle innerhalb der VWS beleuchtet. Abbildung 15 bietet dabei einen High-Level Überblick über die angebotenen Services der Produktionsinseln. Unter Einbeziehung von Standards wie bspw. ECLASS[47] wird verdeutlicht, wie ein Matching der angebotenen und der angeforderten Services aussehen kann. Abschließend wird gezeigt, wie Partner durch die Auswahl geeigneter Technologien ihre eigenen Dienstleistungen in das Produktionsnetzwerk integrieren und so anbieten können. Dies fördert eine kooperative Umgebung und eröffnet neue Chancen für eine erfolgreiche Zusammenarbeit innerhalb eines Produktionsnetzwerks.

Umsetzung in der Unternehmens-Verwaltungsschale

Durch die Unternehmens-VWS wird ein spezifisches Unternehmen sowie dessen angebotene Dienstleistungen beschrieben. Die Beschreibung erfolgt unter anderem durch die von der Industrial Digital Twin Association[9] (IDTA) standardisierten Submodelle (SM) der VWS. So wird etwa das Teilmodell Digital Nameplate for Industrial Equipment genutzt, um Informationen über firmenspezifische Anlagen innerhalb einer standardisierten Eigenschaftenstruktur bereitzustellen. Mithilfe dieses digitalen Typenschilds verbessert sich die Interoperabilität beim Austausch von Informationen über Anlagen verschiedener Hersteller. Neben den standardisierten Submodellen

47 *ECLASS: https://eclass.eu/*
ECLASS: ECLASS ist ein Datenstandard für die Klassifizierung von Produkten und Dienstleistungen mit Hilfe von standardisierten ISO-konformen Merkmalen. Der ECLASS-Standard ermöglicht den digitalen Austausch von Produktstammdaten über Branchen, Länder, Sprachen oder Organisationen hinweg. Als ISO -konformer und weltweit einziger merkmalsbasierter Klassifikationsstandard dient ECLASS auch als „Sprache" für Industrie 4.0.

wurde das SM AssuredServices unter Zuhilfenahme von Normen wie bspw. der DIN EN ISO 9001 für Qualitätsmanagementsysteme erstellt. Dieses listet und beschreibt die Services der Produktionsinseln, namentlich _CAPRI, _KUBA, _JAVA, _MILOS und _SKYE.

Innerhalb dieses Submodells werden die einzelnen Services durch die hierarchisch untergliederten Submodel Element Collections (SMC), den sogenannten ServiceOfferings, detailliert beschrieben. Es handelt sich bei den angebotenen Services sowohl um Produktionsdienstleistungen wie bspw. Fräsen oder 3D-Druck, als auch um Softwaredienstleistungen wie der Qualitätskontrolle, die auf der Produktionsinsel_KUBA durch eine KI-basierte Bilderkennung durchgeführt wird. Davon abhängig erfolgt die Beschreibung der Dienstleistung nach den in Abbildung 16 visualisierten Schemata. Auf der Serviceebene handelt es sich dabei um eine übergeordnete Beschreibung, die auf der Capability-Ebene weiter spezifiziert werden kann. Einige SMC bzw. Properties sind in beiden Beschreibungsformen zu finden. So wird im ServiceName die Bezeichnung des Services sowie eine Identifikationsnummer eingetragen. Bei der Identifikationsnummer handelt es sich, wenn möglich, um einen sogenannten IRDI (International Registration Data Identifier) aus dem ECLASS-Katalog. Dadurch wird der Service durch standardisierte, ISO-konforme Merkmale beschrieben. Wird der Service nicht innerhalb der ECLASS oder auch dem IEC Common Data Dictionary (IEC CDD) definiert, wird eine individuell angepasste Identifikation gewählt. Unter dem SMC GeneralConditions werden Eigenschaften, wie z.B. mögliche Materialien oder Dimensionen, spezifiziert. Die für das Zustandekommen eines Auftrags notwendigen Informationen werden jeweils in TermsOfDeliveryAndPayment und OtherAgreements

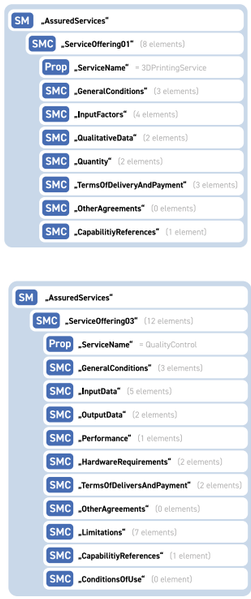


Abbildung 16: Darstellung der SMC ServiceOffering für Produktions- (oben) und Softwareservices (unten)

aufgelistet. Im SMC CapabilityReferences wird auf die im Service enthaltenden spezifischen Fähigkeiten eines Unternehmens, die Capabilities, referenziert.

In Abbildung 16 ist das SM für den Produktionsservice 3D-Druck sowie dessen zusätzliche, spezifische SMC visualisiert. Für die Fertigung notwendige Informationen werden unter InputFactors zusammengefasst. Dabei kann es sich bspw. um CAD-Bauteile, extrahierte Features oder auch technische Zeichnungen handeln. Der Service-Anbietende kann hier die benötigten Daten, die zum Ausführen des Fertigungsauftrags notwendig sind, auflisten. Im SMC QualitativeData kann auf Normen verwiesen werden, die generell gültig sind oder speziell für den angebotenen Service eingehalten werden sollen. Das SMC Quantity beinhaltet Angaben zu potenziell fertigbaren Stückzahlen sowie der Verfügbarkeit der hergestellten Bauteile. In Abbildung 16 ist ebenfalls das SM für den Softwareservice QualityControl 3D-Druck abgebildet. Hier wird etwa das SMC InputData genutzt, um den Aufbau der Eingangsdaten vorzugeben, bspw. über die Bildauflösung. Die Ausgangsdaten werden innerhalb des SMC OutputData beschrieben. Zudem können weitere Eigenschaften des Softwareservice wie Performanceeigenschaften, Anforderungen an die Hardware oder Limitierungen durch unter anderem die Lichtverhältnisse in den dafür vorgesehenen SMCs Performance, HardwareRequirements und Limitations beschrieben werden. Allgemein kann die Anzahl der Elemente in einem SMC abhängig vom Service variieren. Hierbei ist das Ziel, die SMCs nur mit den Informationen zu füllen, die in kaufmännischen Prozessen für eine Entscheidungsfindung benötigt werden. Durch die hier vorgestellte standardisierte Beschreibung der Services wird es verschiedenen Unternehmen ermöglicht, ihre spezifischen Services im Federated Catalogue anbieten zu können.

Umsetzung in der Produkt-Verwaltungsschale

Neben der Umsetzung innerhalb der Unternehmens-VWS müssen die Services für ein späteres Matching auch innerhalb der Produkt-VWS abgebildet werden. Aufbauend auf den Anforderungen, die entweder im Submodell PartSpecification bei einem Fertigungsteil oder im Submodell BillOfMaterials bei einem Montageteil der Produkt-VWS definiert sind, lassen sich die zur Produktion des Produktes benötigten Services ableiten. Hierzu muss technisches KnowHow vorhanden sein, um die Produktanforderungen auf vorhandene Dienstleistungen zu matchen. Innerhalb des Submodells RequestForServices (siehe Abbildung 17) werden diese dann durch hierarchisch untergliederte SMC, Referenzen und Properties abgebildet.

Abbildung 17: Teilmodell RequestForServices der Produktverwaltungsschale

Abbildung 17 zeigt das Submodel mit drei beispielhaften RequestedServices. Innerhalb der SMCs werden auf andere SMs, die mitgeschickt werden sollen, referenziert, wie bspw. das SM PartSpecification oder BillOfMaterial. Um die Wirtschaftlichkeit des Produktionsprozesses zu berücksichtigen, ist es nicht sinnvoll, die Produktionsschritte kleinteilig auf verschiedene Unternehmen aufzuteilen. Daher erfolgt die Aggregation der Services nach der Einteilung der Fertigungsverfahren nach Norm DIN 8580.[48] Die Services werden, ähnlich wie in der Unternehmens-VWS, innerhalb der Property ServiceName beschrieben, und mit einer Identifikationsnummer hinterlegt. Jede SMC RequestedService enthält bei einem Fertigungsbauteil zudem eine Referenz auf das SM PartSpecification, da dort die zu fertigenden Features hinterlegt sind. Zudem sind die zugehörige Hauptgruppe der Fertigungsverfahren (Norm) und der Status der Ausschreibung über die Eigenschaft CallForProposalStatus hinterlegt. Der Abgleich der Identifikationsnummern zwischen dem Teilmodell AssuredService der Unternehmens-VWS und dem RequestOfService der Produkt-VWS bilden die Grundlage für das Matching der Services.

Integration externer Services

Auf den Rechenressourcen der einzelnen Produktionsinseln werden die VWS der Unternehmen gehostet und über eine Schnittstelle, dem Federated Catalogue, verfügbar gemacht. Die Integration von externen Services ist somit durch die Bereitstellung der unternehmensspezifischen VWS sowie durch den Einsatz der EDC möglich. Projekte wie die Einbindung eines 3D-Druck-Service in Kooperation mit der Plattform ARENA2036[2] zeigen, dass externe Services in den Federated Catalogue aufgenommen und so innerhalb des Produktionsnetzwerks nutzbar gemacht werden können.

48 Springer Link: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-54702-1_2

06

Mit Produktions-Skills zur automatisierten Produktion von Morgen

Die Globalisierung und die zunehmende Individualisierung von Produkten stellen die Hersteller vor die Herausforderung, flexibler auf Änderungen reagieren zu müssen. Um diese Herausforderungen zu bewerkstelligen, werden Produktionsressourcen nicht länger als feste Einheiten betrachtet, sondern vielmehr als austauschbare Module konzipiert. Diese werden als Cyber-Physische Produktionsmodule (CPPM) bezeichnet. CPPM werden als autonome Elemente definiert, die in einer kontextbezogenen Weise mit ihrer Umgebung interagieren, standardisierte Schnittstellen aufweisen, sowie eigenständige Funktionalitäten besitzen.[49]

49 Hermann, Jesko. „Dynamische Generierung alternativer Fertigungsfolgen im Kontext von Production as a Service"

Eine solche Lösung, die im Bereich der industriellen Automatisierung entwickelt wurde, wird als Skill-based Engineering bezeichnet.[50] Ein Skill ist eine semantische und herstellerunabhängige Beschreibung der Funktionalität einer Ressource, die über Befehlsfunktionen, Funktionsblöcke oder Schnittstellen bereitgestellt wird. Skills gehören immer zu Ressourcen und werden aus der Sicht einer abstrahierten Ressource beschrieben.[51] Obwohl Skill-Schnittstellen durch verschiedene Kommunikationstechnologien realisiert werden können, hat sich OPC UA in der Automatisierungstechnologie und dem Maschinenzugriff seit Jahren bewährt. Das Skill-Interface ermöglicht Aufrufung und Parametrierung. Dadurch wird eine schnelle Neukonfiguration von CPPM, die Anpassung an neue Produktvarianten und eine verkürzte Inbetriebnahme neuer CPPM ermöglicht. Somit führen Maschinen nicht mehr starre Befehle aus, sondern bieten komplexe Aufgaben an und kümmern sich eigenständig um deren Ausführung.

Skills können auf verschiedenen Granularitätsebenen eingesetzt werden. Durch Skill-Hierarchien werden komplexe Systeme realisiert, bei denen atomare Skills (atomic skills) zu zusammengesetzten Skills (composed skills) kombiniert werden. Ein Skill zeichnet sich durch zustandsbehaftetes Verhalten aus, was bedeutet, dass die Implementierung ein sogenanntes Skill-Modell erfordert, das die Struktur und die entsprechende Zustandsmaschine definiert. Die Struktur wird in Form von OPC UA-Objekten dargestellt, die als Informationsmodell im OPC UA-Adressraum organisiert sind.

In diesem Kapitel stellen wir das im Rahmen von smart-MA-X entwickelte Skill-Modell vor und demonstrieren den Einsatz von Skills anhand einer Fräsmaschine. Dieses Kapitel basiert auf unseren vorangehenden Veröffentlichungen[52,53], in denen wir die Bedeutung von Standardisierung und Machbarkeitsanalysen für Skills hervorheben.

Aufbau und Standardisierung von Skills

Um das Konzept der Skills optimal nutzen zu können, muss es in ein standardisiertes Informationsmodell eingebettet werden. Die OPC UA-Foundation[54] bietet die Möglichkeit, eine benutzerdefinierte Skill-Schnittstelle in

50 Malakuti, Somayeh, et al. „Challenges in skill-based engineering of industrial automation systems." 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Vol. 1. IEEE, 2018.
51 Backhaus, Julian Christoph Sebastian. Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme. Vol. 319. Herbert Utz Verlag, 2016.
52 Wagner, Andreas, et al. „Interaction between FeasibilityCheck, PreconditionCheck and SkillExecution in skill-based machining." 2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE, 2023.
53 Jungbluth, Simon, et al. „Developing a skill-based flexible transport system using OPC UA." at-Automatisierungstechnik 71.2 (2023): 163-175.
54 OPC UA Foundation: https://opcfoundation.org/

Form einer Companion Specification aufzubauen. Aktuell gibt es jedoch keine einheitliche Sichtweise hinsichtlich der Ausgestaltung von Skills von der Skill-based Community. Aufbauend auf den bestehenden Umsetzungen und Erfahrungen der *SmartFactory*KL haben wir im Rahmen des Projekts smartMA-X ein eigenes Nodeset für Skills entwickelt.

Dabei basiert die Nodeset-Entwicklung auf den nachfolgenden Kernanforderungen:

+ Die Schnittstelle muss das Modul beschreiben und eine definierte Struktur bereitstellen, um Informationen zu speichern.
+ Die Interaktionselemente der Schnittstelle müssen vorliegenden Standards entsprechen, um die Wiederverwendbarkeit zu ermöglichen.[55]
+ Um die Komplexität der Module zu kapseln, muss eine Schnittstelle für Planungs- und Ausführungssysteme bereitgestellt werden.
+ Dies führt zur Notwendigkeit, das interne Verhalten des CPPM in einer standardisierten Weise abzubilden, z. B. als Zustandsmaschine.
+ Obwohl die Schnittstelle für sich alleinsteht, gehört das Modul zu einer dynamischen Umgebung, die den Kontext des CPPM definiert. Daher müssen CPPM ihre Umgebung erkennen, interpretieren und sich an diese anpassen können.

Nachfolgend wird in Abbildung 18 die Struktur eines Skill-basierten CPPM vorgestellt:

+ Resources beschreiben für vorgesehene Tätigkeiten benötigte Prozessmaterialien.
+ Das Monitoring verschiedener Assets dient der Überwachung (prozess-)relevanter Variablen. Dazu zählen Informationen wie Prozesstemperaturen oder aktuelle Position.
+ Components enthält Hardware aus weiteren OPC UA Companion Specifications[55] sowie benutzerdefinierte Assets, welche physisch am CPPM verbaut sind. Beispiele dafür sind Roboter, Greifer oder Achsen.
+ Der Lock implementiert eine Zugangskontrolle, welche parallelen Zugriff auf ein CPPM vermeiden soll, und implementiert unterschiedliche Rollen entsprechend OPC 10000-100: Devices.
+ Das SkillSet ist die Sammlung aller diesem CPPM direkt zugeordneten Skills.

Components können lediglich atomare Skills enthalten, zusammengesetzte Skills sind im CPPM-SkillSet zu modellieren. Skills werden dabei durch ein sog. ParameterSet konfiguriert und stellen die Ergebnisse in den FinalResultData nach Beendigung zur Verfügung. Skills werden dabei in zwei Skill-Typen, namentlich kontinuierliche und finite Skills, unterteilt. Diese Skill-Typen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Zustandsmaschine. Ein finiter Skill hat immer einen definierten Anfang und ein definiertes Ende, durch das ein vorliegender Eingangszustand in einen gewünschten Ausgangszustand transformiert wird. Beispiele sind Handhabungsfunktionen oder Materialabtragungen. Kontinuierliche Skills beschreiben hingegen Prozesse, welche erst nach Aufforderung beendet werden. Beispiele sind Förderbänder, Heizbetten oder Energiezufuhren. Dabei orientieren sich die Zustände an OPC-30050: PackML – Packaging Control.

Der Aufbau unserer Skills zeichnet sich durch drei generelle Charakteristiken aus, FeasibilityCheck, PreconditionCheck und SkillExecution (siehe Abbildung 19). Dies ist notwendig, da im Voraus verschiedene Prüfungen erforderlich sind, um komplexere Skills zu verarbeiten und den Steuerungs- und Produktionsprozess effizient durchzuführen.

55 *Mit Standards sind OPC UA Companion Specifications gemeint. Darunter OPC 30050: PackML - Packaging Control und OPC 40501 for Machine Tools für die Ausgestaltung der Schnittstelle und OPC 10000-100: Devices und z.B.: OPC 40010-1: Robotics - Vertical Integration zur Intergration.*

Mit Produktions-Skills zur automatisierten Produktion von Morgen

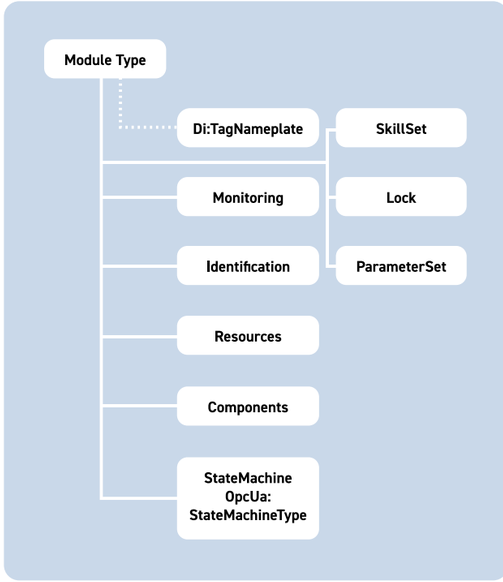


Abbildung 18: OPC UA-Struktur eines Cyber-Physischen Produktionsmoduls (CPPM)

+ Der FeasibilityCheck überprüft die prinzipielle Machbarkeit des zugehörigen Skills. Im Fall von Bearbeitungsskills wird hier ein Fertigungsprozess simuliert. Dazu werden geeignete Werkzeuge, Spannmittel und Prozessparameter ausgewählt und Trajektorien (z. B. G-Codes) generiert. Da der FeasibilityCheck die allgemeine Durchführbarkeit prüft, werden alle Werkzeuge und Spannmittel in der Maschine und dem Lager berücksichtigt. Darüber hinaus werden auch die simulierten oder geschätzten Werte für die Produktionszeit und den Energieverbrauch zurückgegeben. Die beschriebenen Überprüfungen können einige Zeit in Anspruch nehmen, womit der FeasibilityCheck mit einer Zustandsmaschine analog zu den finiten Skills ausgestattet wird.
+ Im Gegensatz zum FeasibilityCheck überprüft der PreconditionCheck die aktuelle Durchführbarkeit kurz vor der Ausführung. Hierzu greift er auf die internen Ergebnisse des FeasibilityChecks zu und überprüft deren Gültigkeit. Falls diese nicht mehr gültig sind, beispielsweise weil ein für den Prozess ausgewähltes Werkzeug nicht mehr vorhanden ist, muss der FeasibilityCheck erneut durchgeführt werden. Wenn die Ergebnisse noch gültig sind, werden alle Voraussetzungen, die für eine erfolgreiche Bearbeitung notwendig sind, überprüft. Dazu gehören beispielsweise, ob alle benötigten Werkzeuge im Magazin der Maschine verfügbar sind, ob die notwendige Spannausrüstung eingebaut ist und ob ausreichend Kühlschmierstoff in der Maschine vorhanden ist. Eine Ausnahme betrifft das Werkstück selbst. Dadurch wird sichergestellt, dass das Werkstück nicht transportiert wird, bevor sicher ist, dass der Skill ordnungsgemäß ausgeführt werden kann.
+ Die reale Ausführung des Skills erfolgt in der Skill-Execution. Es wird überprüft, ob die Ergebnisse der vorherigen Prüfungen immer noch gültig sind und zusätzlich, ob das Werkstück ordnungsgemäß eingespannt ist. Wenn alle Voraussetzungen erfüllt sind, beginnt der Skill automatisch mit der Ausführung. Während des Prozesses werden relevante Daten aufgezeichnet, die in die Entscheidungsalgorithmen von FeasibilityCheck und PreconditionCheck zurückgespielt werden, um deren Aussagekraft und Verlässlichkeit zu verbessern. Neben den aufgezeichneten Prozessdaten werden der Energiebedarf sowie die Produktionszeit gemessen. Diese Messdaten werden zur Verbesserung der Vorhersagen des FeasibilityChecks verwendet und in einem Submodell der Produkt-VWS gespeichert. Auf diese Weise bilden die in den Skills aufgezeichneten Daten die Basis, um den CO_2-Fußabdruck eines Produkts über jeden einzelnen Prozessschritt hinweg aufzusummieren und nachzuverfolgen.

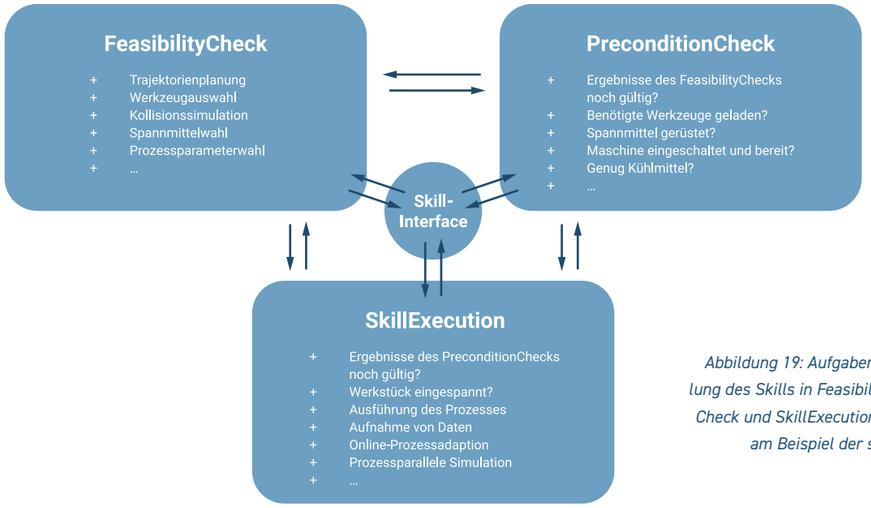


Abbildung 19: Aufgabenbereiche und Unterteilung des Skills in FeasibilityCheck, PreconditionCheck und SkillExecution sowie Skill-Interface[52] am Beispiel der spanenden Bearbeitung

Einsatz von Skills am Beispiel einer Werkzeugmaschine

Die Implementierung der beschriebenen Architektur wurde auf einer B&R® PLC X20CP1584 durchgeführt, die mit einer EMCO® Concept Mill 105 als Werkzeugmaschine verbunden ist. Zur Datenspeicherung wird eine Microsoft® SQL 2014 Express-Datenbank verwendet. Ein in Python geschriebener OPC UA-Adapter[56] konvertiert die Knotenstruktur des Standard OPC UA-Servers der Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS). Dies ist notwendig, da der integrierte OPC UA-Server keine Individualisierung des Nodesets ermöglicht. Auf diese Weise kann ein OPC UA-Client den Skill auf standardmäßige Weise steuern. Da der Adapter eine reine Abbildungsfunktion hat, werden wir ihn im Folgenden nicht berücksichtigen und die Interaktionen als direkte Interaktionen mit der SPS beschreiben. Um den G-Code für die Fräsmaschine zu generieren, werden G-Code-Zyklen verwendet. Die bereitgestellten Parameter aus dem ParameterSet werden bei Bedarf berechnet und in die Eingangsparameter des G-Code-Zyklus geschrieben. Für jeden angebotenen Skill sieht der Arbeitsablauf wie folgt aus. Der Client übermittelt alle erforderlichen Parameter für einen Skill an das entsprechende ParameterSet des FeasibilityChecks auf dem OPC UA-Server und startet ihn, indem er die Zustandsmaschine des FeasibilityChecks steuert. Zunächst überprüft das Programm die Datenbank auf ein bereits zuvor berechnetes, identisches ParameterSet. Wenn keine Übereinstimmung gefunden werden kann, werden die geladenen Werkzeuge in der Maschine gelesen, um die Werkzeugliste in der Datenbank zu aktualisieren. Im nächsten Schritt wird basierend auf dem bereitgestellten ParameterSet das beste Werkzeug aus der Datenbankliste ausgewählt. Die Liste enthält nun alle verfügbaren Werkzeuge des Shopfloors, die für die Maschine geeignet sind. Wenn ein passendes ParameterSet gefunden wurde, kann eine Überprüfung auf ein neues, geeigneteres Werkzeug durchgeführt werden. Anschließend wird eine umfassende Gültigkeitsprüfung der angegebenen und abgeleiteten Parameter durchgeführt, einschließlich der Grenzwerte der Maschine und des ausgewählten Werkzeugs. Eine umfassende Simulation, z. B. zur Bestimmung von Zeit, Kosten oder dem Energieverbrauch sowie einer kollisionsfreien Ausführung der Werkzeugbahn ist noch nicht implementiert und wird als Blackbox angesehen. Sie finden nur als Platzhalter im eigentlichen Programm statt. Unabhängig vom Ergebnis der einzelnen Überprüfungsschritte wird jedes neue ParameterSet in der Datenbank gespeichert und mit einer eindeutigen ID versehen. Der ParameterSet-Eintrag in der Datenbank enthält nicht nur die Werte, sondern auch das Ergebnis der Überprüfungen und einen Zeitstempel. Wenn der FeasibilityCheck für ein vorhandenes ParameterSet ein neues Werkzeug auswählt, werden die Werte in der Datenbank aktualisiert. Zum Schluss wird die eindeutige ID des ParameterSets und die anderen Ergebnisse in die Final ResultData des FeasibilityChecks geschrieben.

Der PreconditionCheck nimmt lediglich die eindeutige ParameterSetID als Eingabeparameter für seine Ausführung entgegen, um zu bestimmen, ob die Fräsbearbeitung durchgeführt werden kann und alle Randbedingungen erfüllt sind. Daher wird das vollständige ParameterSet aus der Datenbank abgerufen. Die Werkzeugliste der Maschine wird gelesen, um die verfügbaren Werkzeuge mit dem vom FeasibilityCheck ausgewählten Werkzeug zu vergleichen. Wenn kein geeignetes Werkzeug in der Maschine eingesetzt ist, wird die Werkzeug-ID für das zuvor ausgewählte Werkzeug in die FinalResultData geschrieben, damit es geladen werden kann. Weiterhin wird überprüft, ob die Werkzeugmaschine eingeschaltet ist, ob die Achsen in einem referenzierten Zustand sind und ob auf der Fräsmaschine derzeit kein Alarm vorliegt. Das Ergebnis wird zusammen mit den bereits durch den FeasibilityCheck ermittelten Informationen in die FinalResultData des PreconditionCheck geschrieben. Wenn die bereitgestellte ParameterSetID nicht gefunden werden kann oder keine ID angegeben ist, schlägt die Prüfung fehl und gibt die Information für den Client zurück, den FeasibilityCheck zuerst auszuführen.

Die SkillExecution bleibt aufgrund dieser Architektur einfach. Ähnlich wie beim PreconditionCheck wird lediglich die eindeutige ParameterSetID übergeben. Der Skill startet den PreconditionCheck und wartet auf sein Ergebnis. Zusätzlich wird überprüft, ob die Spannvorrichtung geschlossen ist. Wenn die Überprüfungen positiv ausfallen, schließt die SPS die Tür der Fräsmaschine, überträgt den generierten G-Code-Zyklus und startet das NC-Programm. Ein generisches NC-Programm wird als Hauptprogramm verwendet, während der generierte G-Code als Unterprogramm übertragen und dann vom Hauptprogramm aufgerufen wird. Während des Fräsprozesses misst die SPS die Ausführungszeit. Wenn das NC-Programm abgeschlossen ist, schreibt die SPS die gemessene Produktionszeit zurück in die FinalResultData der SkillExecution und ändert den Zustand der Zustandsmaschine.

Das Skill-Interface wurde mithilfe von Siemens® SiOME[57] erstellt und als Nodeset2.xml-Datei in den Python OPC UA-Adapter importiert. Wie in Abbildung 20 dargestellt, sind der FeasibilityCheck, der PreconditionCheck und die SkillExecution unter dem Skill-Knoten modelliert.

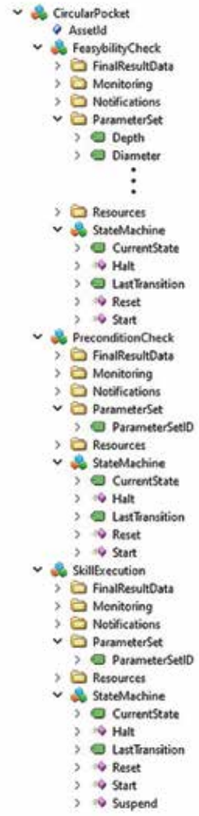


Abbildung 20: OPC UA-Struktur eines Skills am Beispiel einer Kreistasche[52]

56 Python opcua-asyncio ist eine Open-Source-Bibliothek zur Implementierung von asynchronen OPC UA Clients und Servern: https://github.com/FreeOpcUa/opcua-asyncio

57 SiOME: https://support.industry.siemens.com/cs/document/109755133/siemens-opc-ua-modeling-editor-(siome)?dti=0&lc=de-DE

07

Flexible Produktionsplanung und -steuerung: Die Rolle von Multi-Agenten-Systemen in komplexen industriellen Systemen

Entsprechend der Systemarchitektur einer Produktionsinsel (siehe Kapitel 2) wird im Rahmen der Shared Production ein autonomes, intelligentes und resilientes Planungs- und Steuerungssystem benötigt. Leitão und Karnouskos[58] identifizieren dabei drei Haupttypen von Steuerungsstrukturen in industriellen Fertigungssystemen:

- *zentralisiert*
- *(modifiziert) hierarchisch*
- *(semi-) heterarchisch*

58 Leitão, Paulo, and Stamatis Karnouskos, eds. „Industrial agents: emerging applications of software agents in industry." (2015).

Die Rolle von Multi-Agenten-Systemen in komplexen industriellen Systemen

Eine zentralisierte Architektur hat nur eine einzige Entscheidungseinheit an der Spitze des Systems. Zentralistische Systeme haben den Vorteil, dass sämtliches Wissen an einem Ort zusammengefasst ist, was eine globale Optimierung ermöglicht. Die Herausforderung besteht jedoch darin, dass die synchronisierte Bereitstellung aller Daten zur Entscheidungsfindung oft zu einer Überlastung der Kommunikationssysteme führt. Zudem ist die globale Lösung eines Steuerungsproblems oft komplexer als die dezentrale Lösung. Eine hierarchische Organisation der Steuerung verteilt die Entscheidungsfindung über mehrere Verhaltensebenen. Höhere Ebenen treffen strategieorientierte Entscheidungen, während niedrigere Ebenen sich auf einfache operative Aufgaben konzentrieren. Solche Architekturen können in statischen Produktionsumgebungen effizient sein und sind robuster gegenüber Ausfällen als zentralisierte Kontrollstrukturen. Die heterarchischen Architekturen setzen auf Kooperation und Zusammenarbeit zur Entscheidungsfindung. Eine solche Organisation ist typisch für Multi-Agenten-Systeme (MAS). Diese Steuerungsstrukturen sind äußerst flexibel, aber die globalen Optimierungsziele sind schwer zu erreichen, da Wissen und Entscheidungen von jedem Agenten lokalisiert sind. Dies führte zur Entstehung von semi-heterarchischen Steuerungsstrukturen, die auch als lockere oder flexible Hierarchien bezeichnet werden. Niedrigere Ebenen solcher Architekturen sollten schnell auf Störungen reagieren. Dies wird durch hierarchische Organisation und hauptsächlich reaktive Agenten erreicht. Die höheren Ebenen realisieren die Flexibilität der heterarchischen Strukturen und die intelligente Entscheidungsfindung durch deliberative Agenten. Semi-heterarchische Kontrollstrukturen sind typisch für sogenannte holonische Architekturen. Diese Kapitel stellt eine holonische Struktur zur Gewährleistung einer flexiblen Struktur zur Realisierung der Shared Production vor. An dieser Stelle möchten wir darauf hinweisen, dass eine ausführliche wissenschaftliche Ausarbeitung in unserer Veröffentlichung zur Beschreibung eines holonischen Multi-Agenten-System Testbeds[59] zu finden ist.

Agenten und Holons

Die Erforschung von MAS begann im Bereich der verteilten Künstlichen Intelligenz (Distributed Artificial Intelligence). Hierbei wird das globale Verhalten basierend auf dem festgelegten Verhalten der Agenten untersucht. Die Studien beschäftigen sich mit Koordination und Verteilung von Wissen. In diesem Zusammenhang definieren Leitão und Karnouskos[58] einen Agenten als eine autonome, problemlösende und zielgerichtete rechnergesteuerte Entität mit sozialen Fähigkeiten, die in der Lage ist, in einer offenen und dynamischen Umgebung effektives, vielleicht sogar proaktives Verhalten zu zeigen, indem sie diese Umgebung beobachtet und darauf reagiert, um ihre Ziele zu erreichen. MAS ist ein Verbund von (semi-)autonomen Problemlösern, die zusammenarbeiten, um ihre individuellen sowie die globalen Ziele des Systems zu erreichen. Hierzu verlassen sie sich auf Kommunikation, Zusammenarbeit, Verhandlung und die Delegation von Verantwortung[58]. MAS wurden durch Themen wie Autonomie und Zusammenarbeit als allgemeine Softwaretechnologie motiviert, während ihre Anwendung im Bereich der Fertigung in letzter Zeit zunehmend wächst.

Das holonische Konzept wurde von Koestler[60] vorgeschlagen, um natürliche Wesen zu beschreiben, die aus halbautonomen Teilen bestehen, die miteinander verbunden sind, um ein Ganzes zu bilden. Das holonische Produktionssystem (HMS, engl. Holonic Manufacturing System) ist ein Fertigungskonzept, um die Fähigkeit von Fertigungssystemen zu verbessern, um die Veränderung von Produkten zu handhaben und sie an anomale Betriebsbedingungen

59 Bernhard, T. Alexis, et al. "I4.0 Holonic Multi-Agent Testbed EnablingShared Production", Artificial Intelligence in Manufacturing
60 Koestler, Arthur. „The ghost in the machine." (1968).

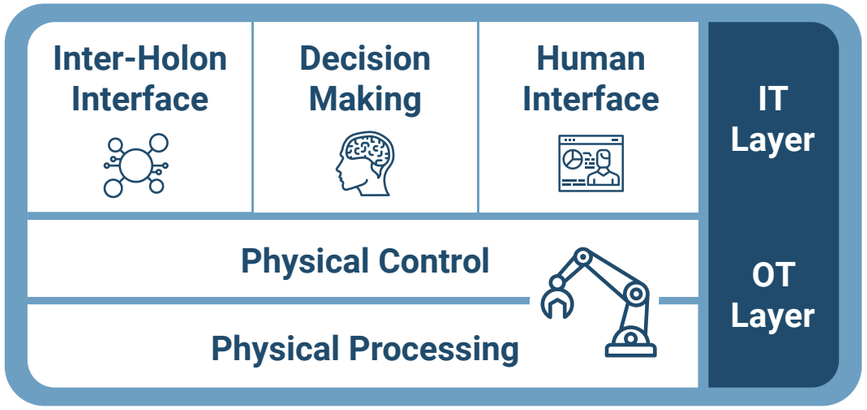


Abbildung 21: Unterteilung eines Holons in einen informationsverarbeitenden Teil und einen physischen Verarbeitungsteil[63]

anzupassen.[61] Holonische Produktionssysteme werden grundlegend in der Referenzarchitektur PROSA beschrieben, mit dem Ziel, Produktionssystemen eine höhere Flexibilität und Anpassungsfähigkeit zu bieten.[62] Ein Holon ist ein autonomer, intelligenter und kooperativer Baustein eines Fertigungssystems, der Informationen und physische Objekte transformiert, transportiert, speichert und/oder validiert. Ein Holon besitzt immer einen informationsverarbeitenden Teil und oft auch einen physischen Verarbeitungsteil (siehe Abbildung 21).[63]

Holons treten Holarchien bei[64], welche die Regeln für die Interaktion zwischen ihnen festlegen. Jedes Holon kann gleichzeitig Teil mehrerer Holarchien sein und selbst eine Holarchie darstellen. Dadurch entstehen sehr komplexe und flexible Steuerungsstrukturen, die auch als flexible Hierarchien bezeichnet werden. Es ist wichtig zu beachten, dass der Kooperationsprozess auch Menschen einbezieht, die in den Kontext des Holons eintreten oder ihn verlassen können.[63] Zusammenfassend kann ein HMS als Analogie zu einem CPPS betrachtet werden, bei dem Skills die Steuerschnittstelle zu den physischen Verarbeitungsteilen bereitstellen. Im Hinblick auf modulare Produktionssysteme ist das Konzept der Produktionsskills von CPPMs essenziell zur Gewährleistung der Interaktion einer Multi-Agenten Architektur mit einer Hardware-Ebene[24] (siehe Kapitel 6). Um nun in einer dynamischen Umgebung interagieren zu können, benötigen Agenten ein System- und Umgebungsmodell sowie eine (standardisierte) Kommunikation. Ersteres dient dazu, das jeweilige Domänenwissen des Agenten zu beschreiben, das Verhalten des Agenten zu konfigurieren und Informationen aus externen Wissensquellen oder anderen Agenten zu aggregieren.[58] Hierbei sollte die Beschreibung der Umgebung einem standardisierten Informationsmodell folgen. Im Einklang mit CPPS wird die VWS vorgeschlagen, um die Eigenschaften der Agenten einheitlich zu beschreiben (siehe Kapitel 2). Hierzu gehören die Definition von physischen Verbindungen, Identifikation, Topologie und direkte Kommunikationskanäle. Als Interaktionen zwischen VWS kann auf die I4.0-Sprache (I4.0L) zurückgegriffen werden, die in VDI/VDE 2193 (Blatt 1[11] und Blatt 2[12]) spezifiziert ist. Diese definiert eine Reihe von Regeln, die den Wortschatz, die Nachrichtenstruktur und die semantischen Interaktionsprotokolle umfassen, um die Nachrichtenabläufe in sinnvolle Dialoge zu organisieren. I4.0L implementiert das Bidding Protocol basierend auf dem Contract Network Protocol[65], das zur Aushandlung und Verteilung von Teilaufgaben und Aktionen verwendet werden kann. Eine vereinfachte Interaktion dieses Protokolls kann Abbildung 22 entnommen werden. Hierbei wird eine Auktion durchgeführt, bei der diverse Anbietende Angebote auf eine Ausschreibung abgeben können. Der Auftraggebende hat danach die Möglichkeit, aus einer Vielzahl von Angeboten das passende auszuwählen.

61 Giret, Adriana, and Vicente Botti. „Holons and agents." Journal of intelligent manufacturing 15 (2004): 645-659.
62 Van Brussel, Hendrik, et al. „Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA." Computers in industry 37.3 (1998): 255-274.
63 Christensen, James. „Holonic manufacturing systems-initial architecture and standards directions." 1st Euro. Conf. on HMS, Hannover, Germany, 1994. 1994.
64 Holarchie: Holarchie ist ein von Arthur Koestler eingeführter Begriff, der eine Anordnung von Holonen bezeichnet, die hierarchisch miteinander verbunden sind, wobei jedes Holon an sich eine andere interne Struktur aufweisen kann. Die hierarchischen Schichten sind – im Gegensatz zu klassischen Hierarchien – bei der Holarchie nicht unmittelbar miteinander verbunden. (http://www.logipedia.de/lexikon/Holarchie)

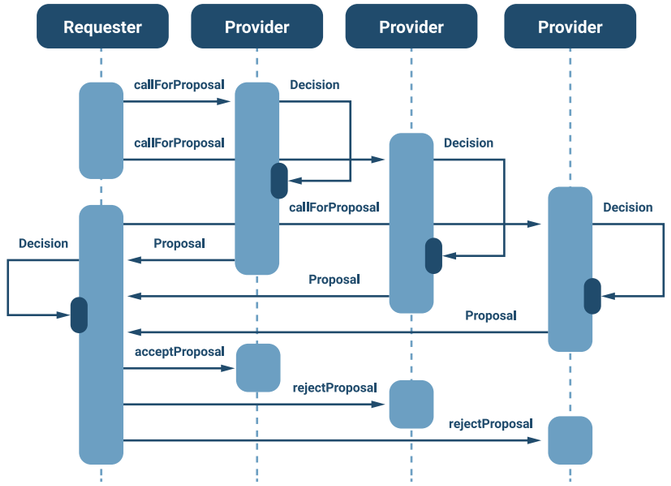


Abbildung 22: Darstellung des Bidding Protocols[66,67]

Holonische Architektur für Unternehmen

Unternehmen benötigen nun eine Architektur, die es gewährleistet, eine Verbindung von der Shopfloor-Ebene zur vernetzten Welt zu ermöglichen. Das CSS-Informationsmodell[10] verspricht Standardisierung, um die Rekonfiguration und dynamische Planung auf der Shopfloor-Ebene zu fördern. Hingegen zeigt die VWS ihre Stärke in Bezug auf die Interoperabilität von Systemelementen. Gaia-X verspricht den Datenaustausch in einem selbstbestimmten und sicheren Weg, bei dem die Teilnehmer über die Souveränität der Daten verfügen können. Nachfolgend zeigen wir, wie wir die oben aufgeführten Konzepte nutzen, um unternehmensübergreifende Lieferketten dynamisch zur Laufzeit zu erstellen. Dabei spiegelt die Architektur die Unternehmenssicht eines Teilnehmers im smartMA-X-System wider. Anknüpfend an die aufgeführten Anforderungen ist ein holonisches System ein vielversprechendes Muster, um die Granularität der Fabrik zu kapseln sowie komplexe und widerstandsfähige Systeme aufzubauen. Unsere Systemarchitektur bündelt die Capabilities der Ressourcen in Diensten und stellt diese Dienste der Außenwelt gemäß den Prinzipien serviceorientierter Systeme bereit.[68]

Darüber hinaus überwacht das holonische System eine Fabrik, um die Produktion zu planen und auszuführen sowie die Verbindung einer Fabrik mit einem Shared Production-Netzwerk herzustellen. Inspiriert von den oben genannten Konzepten wird in Abbildung 23 eine moderne Fabrik dargestellt. Alle Holons sind mit ihrer eigenen VWS ausgestattet, um ihre Selbstbeschreibung offenzulegen. Dies umfasst ein Submodel (SM) Identifikation und ein SM-Interface, welches die Unabhängigkeit zu verschiedenen Kommunikationstechnologien realisiert und unterschiedliche Kommunikationstechnologien (Kafka, MQTT) implementiert. Darüber hinaus beschreibt die SM-Topologie die interne Struktur eines jeden Holons. Ein Teil dieser Struktur sind alle aggregierten Sub-Holons des Holons. Dieses SM erleichtert die Initialisierung jedes Holons, insbesondere im Falle eines Neustarts. Nachfolgend werden die Aufgaben der Holons betrachtet. Das

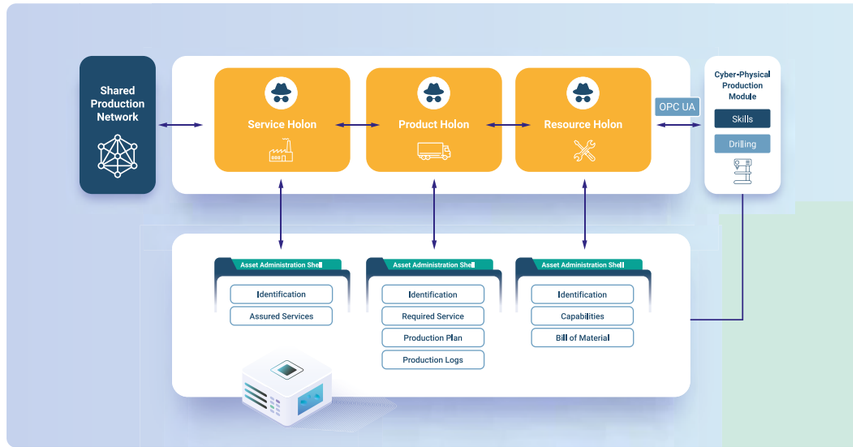


Abbildung 23: Vernetzung des Shopfloors mit der externen Welt durch Nutzung einer holonischen Architektur und der Verwaltungsschale[59]

65 Smith, Reid G. „The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver." IEEE Transactions on computers 29.12 (1980):1104-1113.
66 http://www.fipa.org/specs/fipa00029/SC00029H.html#_ftn1
67 A. Belyaev and C. Diedrich, "Specification 'Demonstrator I4.0 - Language'v3.0," Researchgate. net, 2019. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/334429449_Specification Demonstrator I40-Language v30

Service-Holon verwaltet die Fabrik und bietet die Dienste der vernetzten Welt an. Ein Beispiel für einen Service ist ein 3D-Druck-Service, der die Fähigkeit bietet, individualisierte Produkte mithilfe eines Fused Deposition Modeling Prozesses herzustellen. Neben der Bereitstellung von Diensten ermöglicht das Service-Holon externe Prozesse zu koordinieren, wie das Bestellen eines bestimmten Produkts oder die Ausführung eines bereitgestellten Dienstes. Daher kann das Service-Holon über eine asynchrone, ereignisbasierte Kommunikation, die auf I4.0L basiert, mit dem Shared Production-Netzwerk kommunizieren. Hierbei wird die VDI/VDE 2193 als der gewählte Kommunikationsstandard verwendet und die Datenübertragung findet über Eclipse Dataspace Component-Konnektoren statt. Das Produkt-Holon kümmert sich um den Produktionsprozess und unterteilt Produktionsaufgaben in Teilaufgaben. In diesem Zusammenhang kommt der holonische Ansatz zum Tragen. Jedes Holon ist für eine Aufgabe verantwortlich und erzeugt für jede Teilaufgabe ein Sub-Holon. Zusammen stellen sie den Produktionsprozess in einer baumähnlichen Struktur dar. Dies dient zur Handhabung von modular gekapselten Baugruppen. Fabrikintern gleicht das Produkt-Holon zunächst die von den Ressourcen gegebenen Capability mit der benötigten Capability zur Erfüllung der (Teil-)Aufgabe ab. Wenn beide Capabilities zusammenpassen, wird der FeasibilityCheck (siehe Kapitel 6) an den Ressourcen ausgelöst, um zu simulieren, ob eine Ressource die Aufgabe unter den gestellten Bedingungen ausführen kann. Ist das der Fall, wird die Produktion initiiert und überwacht. Das Ressourcen-Holon handhabt das Management von CPPM und repräsentiert die proaktive Entität, welche die Schnittstellen von OPC UA sowie VWS verwendet und dynamische Interaktionen ermöglicht. Ressourcen-Holons sind zuständig für das Lebenszyklus-Management, die Mensch-Maschine-Interaktion, die Überwachung, die Handhabung mehrerer Kommunikationstechnologien und die Ablaufplanung der Produktionsaufträge. Die Zusammenarbeit der Holons fördert eine flexible Ausführung und Planung, während VWS und Skills die Interoperabilität gewährleisten.

Darstellung der Produktion als Holon

Unser Ressourcen-Holon besteht aus einer beliebigen Anzahl von Holons, bei denen wir zwischen einem Ressourcen-Holon vom Typ Insel und CPPM unterscheiden. Ersteres wird verwendet, um die Existenz von Sub-Holons zu betonen, während letzterer Typ verwendet wird, um die kleinste mögliche Einheit hervorzuheben, die nicht weiter unterteilt werden kann. Wir verwenden diese Unterscheidung, um die Aufgabenbereiche der Holons zu trennen, d.h. um die Verhaltensweisen und Fähigkeiten für jeden Typ zu klassifizieren. Insel-Ressourcen-Holons sind eher für das Lebenszyklus-Management und die Koordination verantwortlich, während CPPM-Ressourcen-Holons die konkreten Aufgaben planen und ausführen. Darüber hinaus umhüllen Insel-Ressourcen-Holons die Gesamtheit aller Teil-Holons, indem sie Proxy-Funktionalität bereitstellen. Zur Förderung eines einheitlichen Verständnisses unterliegt die Kommunikation der I4.0L aus der VDI/VDE 2193.

Insel-Ressourcen-Holons reagieren auf Produktionsanfragen des Produkt-Holons. Dabei werden entweder Produktionsanfragen direkt zu den zugewiesenen Sub-Holons gesendet oder Verhandlungen mit allen Sub-Holons initiiert, um geeignete Ressourcen zu finden und die zeitliche Zuweisung zu realisieren. Die erstgenannte Methode kommt zum Einsatz, wenn eine statische Optimierung angewendet wird, d.h. es soll ein globaler Zeitplan ausgeführt werden. Die letztere Methode implementiert das Bidding Protocol (siehe Abbildung 22), um eine dynamische Optimierung zu fördern. Dabei tritt das jeweilige Insel-Ressourcen-Holon als Auftraggeber auf, das die Sub-Holons auffordert, Angebote für einen Produktionsauftrag abzugeben. Dabei geben die Sub-Holons Angebote im Bereich zwischen 0 und 1 ab, welche das Verlangen, den Auftrag auszuführen, beschreiben. Hierbei werden Bearbeitungszeiten, Umrüstzeiten, Fristen, Verfügbarkeiten und die möglichen Capabilities der Ressource berücksichtigt. Die Berechnung der Angebote erfolgt dabei durch Methoden der Künstlichen Intelligenz. Die Holons wurden dabei in einer Simulationsumgebung trainiert, um auf Basis der lokalen Agenda Angebote auf Abruf zu erstellen. Dabei ist die Basis dieses Algorithmus in unserer Veröffentlichung zur Lösung von Scheduling-Problemen mit Methoden des Deep Reinforcement Learnings[69] zu finden. Um die Anwendung des Ressourcen-Holons in einer Produktionsumgebung zu demonstrieren, wird die Produktionsinsel_KUBA innerhalb der *SmartFactory*^{KL} verwendet (siehe Kapitel 3 und Abbildung 3 zur Erläuterung von _KUBA und den Namenskonventionen). In unserem Beispiel wird ein Modell-LKW (siehe Kapitel 4) montiert. Dabei sei angemerkt, dass die Produktionsinsel_KUBA nicht in der Lage ist, alle Komponenten des Modell-LKWs allein herzustellen. Daher werden die benötigten Komponenten im Sinne der Shared Production auch andernorts gefertigt und an das Connector-Module geliefert. Die Interaktionen des Insel-Ressourcen-Holons und den involvierten Sub-Holons auf der Produktionsinsel_KUBA wird nachfolgend in Abbildung 24 dargestellt.

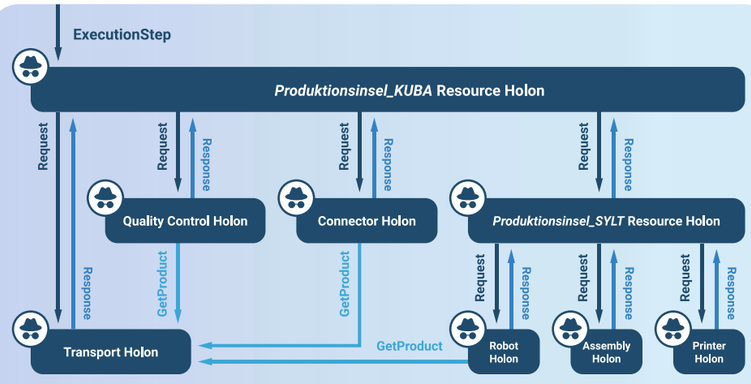


Abbildung 24: Darstellung der Interaktionen zwischen den Holons der Produktionsinsel_KUBA[59]

Soll ein Produktionsschritt ausgeführt werden, überprüft das Produktionsinsel_KUBA-Ressourcen-Holon die Anfrage und fordert als Auftraggeber die Sub-Holons entsprechend auf, die erforderliche Aktion auszuführen. Hierbei findet eine dynamische Optimierung durch Zusammenarbeit statt, indem die Sub-Holons um die Ausführung der Aktion kooperieren und in der Rolle des Anbieters ein Angebot berechnen. Das Produktionsinsel_KUBA-Ressourcen-Holon überprüft die Gebote und verteilt die Arbeitsschritte. Die lokale Entscheidung des CPPM-Ressourcen-Holons führt zu einem globalen Verhalten, bei dem die globale Zuweisung von Ressourcen durch die Auktion optimiert wird. Dieses Verfahren gewährleistet eine lokale Auslastung des CPPM-Ressourcen-Holons und ermöglicht eine bedarfsgesteuerte Planung. Um eine erforderliche Aktion auszuführen, greifen die CPPM-Ressourcen-Holons auf die OPC UA-Skills zu. Während der Ausführung einer Aufgabe können Holons zusammenarbeiten, um Aufgaben auszuführen, die sie allein nicht bewältigen können. Als Beispiel für die Kommunikation zwischen verschiedenen Holons interagieren das Connector-Holon und das Produktionsinsel_SYLT-Ressourcen-Holon mit dem Conveyor-Holon, um Transportmittel für ein bestimmtes Produkt anzufordern. Dieses Verhalten wird realisiert durch die physische Kopplung der CPPM und den damit hergestellten Nachbarschaftsbeziehungen. Durch beidseitig montierte RFID-Tags erhalten Holons Zugriff auf die ID des benachbarten CPPM. Dadurch ist die Selbstbeschreibung zugänglich und CPPM-Ressourcen-Holons können Peer-to-Peer-Verbindungen aufbauen. Dabei verwaltet das Conveyor-Holon die Orchestrierung der Transportmittel durch Routenplanung und Warteschlangenbildung.

68 Huhns, Michael N., and Munindar P. Singh. „Service-oriented computing: Key concepts and principles." IEEE Internet computing 9.1 (2005): 75-81.

69 Popper, J., & Ruskowski, M. (2022). Using Multi-Agent Deep Reinforcement Learning For Flexible Job Shop Scheduling Problems

08

Transfer

Das Projekt smartMA-X steht an der Schnittstelle zwischen ambitionierter Forschung und praxisorientierter Umsetzung in der Welt der Industrie 4.0. Bedeutung und Relevanz von smartMA-X gehen jedoch weit über die technischen Errungenschaften hinaus. Der Schlüssel zum Erfolg dieses Projekts liegt in der effektiven Kommunikation und dem Transfer seiner Ergebnisse und Erkenntnisse in die breite Öffentlichkeit. Dieser Transfer ist entscheidend, um das volle Potenzial von smartMA-X zu entfalten und eine breite Akzeptanz sowie Anwendung in der Industrie zu sichern. Um diesen Transfer zu realisieren, setzt smartMA-X auf eine vielschichtige Kommunikationsstrategie, die sowohl traditionelle als auch innovative Kanäle nutzt.

Förderprojekt TWIN4TRUCKS

Dass der in der Shared Production Kaiserslautern hergestellte Modell-LKW nicht nur ein beliebiges Produktionsbeispiel ist, zeigt das wissenschaftlich-industrielle Förderprojekt TWIN4TRUCKS. Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderte Projekt verbindet in seiner dreijährigen Projektlaufzeit vom 1. September 2022 bis Ende August 2025 wissenschaftliche Forschung und industrielle Umsetzung in einzigartiger Weise. Das Konsortium aus der Daimler Truck AG, dem Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI), Eviden, Infosys, *SmartFactory*^{KL} und PFALZKOM arbeitet an der Zukunft der LKW-Produktion im Mercedes-Benz LKW-Werk der Daimler Truck AG in Wörth am Rhein. TWIN4TRUCKS folgt den in smartMA-X entwickelten Grundideen und bereitet diese auf die industrielle Umsetzung vor. So engagiert sich das Konsortium unter anderem im Ausbau des Federated Service Catalogue, über den Hard- und Software Services angeboten werden sollen. Dazu arbeiten DFKI und *SmartFactory*^{KL} aktuell an der Erweiterung der Produktionsinsel_JAVA. Diese wird durch einen – an die realen Produktionsbedingungen angelehnten – Montage- und Prüfplatz ergänzt, der auf den Erkenntnissen aus smartMA-X aufbaut.

Darüber hinaus entwickelt TWIN4TRUCKS das Konzept des digitalen Fadens auf der Industrial Edge Cloud, durch den bisherige Datensilos zusammengeführt werden sollen. Durch das intelligente Verknüpfen kann die LKW-Produktion transparenter und effizienter gestaltet werden. Beispielhaft könnte eine intelligente Werkerunterstützung oder ein prozess- und unternehmensübergreifendes Tracking von Bauteilen realisiert werden.

Wenn Sie sehen möchten, wie das TWIN4TRUCKS-Konsortium die Konzepte aus smartMA-X auf den realen LKW überführt und diese um den Gedanken des Digital Threads erweitert, dann besuchen Sie das Projekt unter www.twin4trucks.de oder folgen Sie dem Projekt auf LinkedIn: *https://www.linkedin.com/company/89669006/admin/feed/posts/*

Newsletter

In der unregelmäßig erscheinenden Ausgabe unseres *SmartFactory*^{KL}-Newsletters präsentieren wir Einblicke in unser Projekt und in aktuelle Entwicklungen, Fortschritte und Innovationen, die im Zentrum unserer Forschung und Arbeit stehen. Jede Ausgabe ist darauf ausgerichtet, die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse zugänglich zu machen. Unser Fokus liegt dabei nicht nur auf dem Projekt smartMA-X, sondern erstreckt sich auch auf eine Reihe weiterer bedeutender Projekte und Arbeiten der *SmartFactory*^{KL}. Wir beleuchten unter anderem innovative Konzepte in den Bereichen der vernetzten Produktion, der Verwaltungsschale, der Datenräume und viele weitere Themen rund um die Industrie 4.0.

SmartFactory^{KL} LIVE

»*SmartFactory*^{KL} LIVE« ist unser dynamisches monatliches Live-Stream-Format auf YouTube und LinkedIn. Mit Fokus auf Industrie 4.0 und die Produktion von morgen bringen wir führende Köpfe aus Industrie und Forschung zusammen. In den halbstündigen Talks teilen wir wertvolle Erkenntnisse und fördern den Austausch über aktuelle Innovationen. Es ist eine Plattform, die es ermöglicht, tiefgreifende technische Einsichten zu vermitteln und eine Gemeinschaft von Fachleuten, Enthusiasten und Innovatoren in der Welt der Industrie 4.0 zu-

sammenzubringen. Mehrere unserer Streams widmeten sich speziell dem Projekt und der Schlüsselkomponente Datenräume, wobei Experten aus verschiedenen Bereichen ihre Einsichten und Erfahrungen teilten. Diese Diskussionen beleuchteten die wachsende Bedeutung von Datenräumen für die effiziente und sichere Datenverarbeitung in der vernetzten Produktion.

LinkedIn *YouTube*

Hannover Messe

Datenräume werden bei uns auf verschiedenen Veranstaltungen erlebbar, insbesondere auf der Hannover Messe und dem *SmartFactory*KL-Innovationstag, indem wir die neuesten Entwicklungen und Konzepte im Bereich der Shared Production mit dem Demonstrator-Ökosystem vorstellen.

Auf der Hannover Messe sind wir mit einem Stand in Halle 8 vertreten. Unter dem Motto »Resilient, nachhaltig, zukunftsorientiert – *Production Level 4* steht für die Produktion von Morgen« war 2022 die Produktionsinsel_KUBA mit vor Ort, um den Bau eines Modell-LKW beispielhaft vorzuführen und mittels Visualisierungen und Live-Schalten zu den weiteren Produktionsinseln zu verdeutlichen, wie unsere Shared Production funktioniert.

Während der Messe hatten wir die Ehre, auf der Industrie 4.0 Conference Stage einen Vortrag über die jüngsten Ergebnisse des smartMA-X-Projekts und der Shared Production zu halten. Dieser Vortrag, der einen Überblick über unserer Forschungsarbeit bot, zog eine beachtliche Aufmerksamkeit des Fachpublikums auf sich. Die Diskussionen nach dem Vortrag ermöglichten es uns, wertvolles Feedback zu erhalten und neue Ansätze zur Verbesserung unserer Arbeit zu erkunden. 2023 kamen auf der Hannover Messe noch Komponenten hinzu, die die Sichtbarkeit von smartMA-X deutlich erhöhten. Neben der Präsentation auf der Bühne der *SmartFactory*KL und der Industrie 4.0 Conference Stage führten wir eine eigene Guided Tour durch. 2023 wurde außerdem ein Memorandum of Understanding (MoU) mit der ARENA2036 unterzeichnet, das bereits erste Ergebnisse zeigte. Zum einen verfügt die ARENA2036 nun über ein Modul, das Teil der Shared Production Kaiserslautern wird und über das Gaia-X-Ökosystem organisiert Komponenten für den Model-LKW liefert. Zum anderen wurde ein gemeinsames Transfer-Meeting organsiert, das unter der Teilnahme von über 30 Personen in der *SmartFactory*KL stattfand.[70] Auch 2024 wird die *SmartFactory*KL auf der Hannover Messe vertreten sein, um die neuesten Entwicklungen und Ergebnisse verschiedener Projekte zu präsentieren. Dabei werden die Professoren Wahlster, Kagermann und Lukas als die Visionäre von I4.0 erneut auf der Bühne stehen.

Wir laden alle Interessierten herzlich ein, unseren Stand zu besuchen, um Einblicke in die neuesten Innovationen im Bereich der Industrie 4.0 zu gewinnen und direkt mit unseren Experten ins Gespräch zu kommen.

70 https://www.smartfactory.de/transfermeilenstein-in-kaiserslautern/

Market-X

Auf der Market-X Conference & Expo in Wien, die von Gaia-X am 14. und 15. März 2023 organisiert wurde, hatten wir die Gelegenheit, mit einem eigenen Stand unsere Ergebnisse und Fortschritte im Rahmen des smartMA-X-Projekts zu präsentieren. Die Teilnahme an dieser Veranstaltung war für unser Team von immenser Bedeutung, da sie nicht nur die Möglichkeit bot, die neuesten Entwicklungen unseres Projekts einem sachkundigen Publikum vorzustellen, sondern auch tiefgreifende Einblicke in die Geschehnisse rund um Gaia-X, den internationalen Hubs und der Leuchtturmprojekte zu erhalten.

Die Präsentation auf der Market-X war auch eine Gelegenheit, die Bedeutung der Gaia-X-Initiative für die Shared Production betonen. Durch die Teilnahme konnten wir die Kompatibilität unseres Ansatzes mit den Gaia-X-Standards reevaluieren und die Relevanz von smartMA-X im Rahmen der europäischen Bestrebungen zur Schaffung eines souveränen, sicheren und effizienten Datenraums hervorheben.

Tech-X

Unsere Teilnahme an Tech-X Conference & Hackathon in Bilbao, Spanien, war ein herausragendes Ereignis. Die

Veranstaltung, die am 3. und 4. Mai 2023 im Azkuna Centroa stattfand und von Gaia-X und der OSS-Community organisiert wurde, bot eine einzigartige Gelegenheit an realen End-to-End-Szenarien zu arbeiten und aktuelle technologische Herausforderungen des Datenraums zu meistern.

Besonders hervorzuheben ist unser Erfolg beim Hackathon, bei dem wir in Zusammenarbeit mit unseren Partnern TNO und Tecnalia den dritten Platz erreichten. Diese Zusammenarbeit war nicht nur eine Bereicherung für unser Team, sondern auch eine hervorragende Gelegenheit, mit der Gaia-X-Community zu interagieren und gemeinsam an innovativen Lösungen zu arbeiten. Das Event in Bilbao bot eine Plattform, um mit smartMA-X in die Open-Source-Welt von Gaia-X einzutauchen.

Veröffentlichungen

Im Rahmen des smartMA-X-Projekts sind mehrere wissenschaftliche Veröffentlichungen entstanden, ergänzt durch eine Reihe von Diskussionspapieren und Whitepapers. Aktuell liegt unser Fokus darauf, diese Inhalte aufzubereiten und einem breiteren Publikum zugänglich zu machen.

Im Folgenden eine Übersicht aller Veröffentlichungen

Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V.

Trippstadter Straße 122
67663 Kaiserslautern

T +49 (0) 631/20575-3401
F +49 (0) 631/20575-3402
M info@smartfactory.de
W www. smartfactory.de

Vorstand: Prof. Dr. Martin Ruskowski (Vorsitzender)
Andreas Huhmann, HARTING AG & Co. KG
Dr. Detlev Richter, TÜV Süd AG
Eric Brabänder, Empolis Information Management GmbH
Geschäftsführung: Rüdiger Dabelow, DFKI GmbH
Vereinsregisternummer: VR 2458 Kai
Umsatzsteueridentifikationsnummer: DE249965612

Die Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V. (*SmartFactory*^{KL}) ist ein gemeinnütziger Verein, eingetragen im Vereinsregister Kaiserslautern.