

# Ausgestaltung eines digitalen Zwillings im Rahmen von Manufacturing-X

Yohannas Alemayehu

Hochschule Pforzheim  
Tiefenbronnerstr. 65  
75175 Pforzheim  
alemayeh@hs-pforzheim.de

Christian Jakobi

Hochschule Pforzheim  
Tiefenbronnerstr. 65  
75175 Pforzheim  
jakobich@hs-pforzheim.de

Max-Arthur Klink

Hochschule Pforzheim  
Tiefenbronnerstr. 65  
75175 Pforzheim  
klinkmax@hs-pforzheim.de

Julius Weber

Hochschule Pforzheim  
Tiefenbronnerstr. 65  
75175 Pforzheim  
weberjuu@hs-pforzheim.de

Frank Morelli

Hochschule Pforzheim  
Tiefenbronner Straße 65  
75175 Pforzheim  
frank.morelli@hs-pforzheim.de

## ABSTRACT

Die Ausgestaltung von digitalen Zwillingen im Rahmen von Manufacturing-X, einer Initiative zur Förderung eines vernetzten Datenraums in der Ausrüsterindustrie, eröffnet sowohl für Unternehmen in der Ausrüsterindustrie als auch für die Betreiber der Plattform erhebliche Chancenpotenziale. Für einen effektiven und effizienten Einsatz gilt es, zugehörige Rahmenbedingungen zu kennen und notwendige Schritte auf beiden Seiten für eine performante Umsetzung einzuleiten. Hierfür werden Lösungsmöglichkeiten, ausgewählte Geschäftsmodelle und ein eigenes entwickeltes Vorgehensmodell zur Implementierung vorgestellt. Zur Ausgestaltung des Vorgehensmodells erfolgt eine detaillierte Behandlung der technischen Realisierung. Zur Schaffung von Anreizen werden Vorschläge aus anderen Bereichen zur effizienten Nutzung von Manufacturing-X aufgegriffen.

## SCHLÜSSELWÖRTER –

Manufacturing-X; digitaler Zwilling; Geschäftsmodell; Vorgehensmodell; Implementierung

## EINLEITUNG

Als Gründe für die zunehmende Bedeutung von Digitalisierung lassen sich veränderte geopolitische Rahmenbedingungen, Klimawandel und globalen Krisen anführen. Um die Transformation erfolgreich zu bewältigen, benötigen Unternehmen eine transparente Darstellung ihrer Prozesse und Ressourcen über die gesamten Wertschöpfungskette hinweg. Die notwendige Grundlage hierfür bilden digitale Ökosysteme, welche das Teilen von Daten zwischen Unternehmen und weiteren Akteuren der Industrie ermöglichen. Zwei wichtige Bausteine auf dem Weg zu einem digitalen Ökosystem wurden bereits durch GAIA-X und digitale Zwillinge im europäischen Umfeld gelegt:

- Hauptziele von GAIA-X sind die Schaffung einer sicheren Datenaustausch-Infrastruktur in Europa, die Stärkung der digitalen Souveränität und die Reduzierung von Abhängigkeiten von ausländischen Technologien und Dienstleistungen. GAIA-X verfolgt ein föderalistisches, offenes Konzept, das Interaktionen zahlreicher Dienste und Systeme fördert (Otto et al., 2022; Weiss, 2022).
- Catena-X zielt auf den Aufbau eines kollaborativen Datenökosystems ab, das auf Kooperation und ge-

meinsamer Datenverwaltung basiert. Catena-X fokussiert sich speziell auf die gesamte Lieferkette der Automobilindustrie. GAIA-X dient dabei als Framework bzw. Grundlage für Catena-X, was die Zusammenarbeit und Integration der beiden Initiativen erleichtert (BMW Group, 2023; Catena-X, o. D.).

Während die Automobilindustrie mit Catena-X bereits Pionierarbeit geleistet hat und einen GAIA-X Use Case darstellt, soll nun auch die Ausrüsterindustrie dem Beispiel der Automobilindustrie, durch den Aufbau ihres Datenraums Manufacturing-X, folgen (Plattform Industrie 4.0, 2022). Da in diesem Kontext digitale Zwillinge als elementare Bausteine fungieren, wird im Rahmen dieser Arbeit der Anwendungsfall digitale Zwillinge und dessen Treiber sowie die Einbettung im Kontext von Manufacturing-X untersucht. Dabei sind auch rechtliche, organisatorische und technischen Rahmenbedingungen zu beachten bzw. zu gestalten, um die Kollaboration in diesem föderativem Datenökosystem für die Akteure langfristig zu gewährleisten. Der vorliegende Artikel untersucht die Thematik aus folgender Forschungsperspektive: *Welche Vorgehensweise bietet sich für die Ausgestaltung eines digitalen Zwillings im Rahmen von Manufacturing-X an?*

## Manufacturing-X

Manufacturing-X als gemeinsame Initiative von Akteuren aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft, verfolgt das

Ziel, einen Datenraum im Sinne der Industrie 4.0 für eine digital vernetzten Ausrüsterindustrie zu schaffen. Das „X“ steht für „Exchange“ und zielt auf neue Technologien und Innovationen wie zum Beispiel Data Sharing ab (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2023b, 2023c).

Ein Ziel besteht in der Erhöhung bzw. Verbesserung von Resilienz. Ferner soll die datenbasierte Abhängigkeit deutscher und europäischer Unternehmen von dominierenden Digitalplattformen reduziert werden. Neben der Erhöhung der Resilienz ist auch die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit ein wichtiges Ziel der Initiative. Zusätzlich strebt die Manufacturing-X-Initiative auch die Förderung von Nachhaltigkeit an, indem es einen Beitrag zur Klimaneutralität und zum Ökologischen Fußabdruck leisten will (Plattform Industrie 4.0, 2022).

Als Akteure sind sowohl große Konzerne als auch kleine und mittelständische Unternehmen, ggf. auch Startups, im Blickfeld. Als besonders relevant erweisen sich Akteure aus der Industrie 4.0 Sektor. Daneben spielen auch Cloud Provider oder Software-Entwickler eine wichtige Rolle. Aktive Player in Catena-X oder GAIA-X sowie Verbände sind ebenfalls angesprochen, um möglichst viele relevante Akteure zu involvieren (Bitkom e.V., 2023).

### Digitale Zwillinge

Ein digitaler Zwilling steht für die virtuelle Repräsentation eines physischen Objekts oder Systems. Die Kopplung der virtuellen mit der realen Welt ermöglicht es, Daten zu analysieren und Probleme schon vor dem Auftreten zu erkennen. Das hieraus erwachsende bessere Verständnis komplexer Systeme soll zur Optimierung der abgebildeten Systeme und Objekte führen. Der Einsatz von digitalen Zwillingen kann in der Praxis von der Abbildung einzelner Komponenten (Komponentenzwillinge) bis hin zur Abbildung ganzer Prozesse (Prozess-Zwillinge) reichen (Grösser, 2018; IBM, 2023).

Digitale Zwillinge benötigen ein abzubildendes Objekt, beispielsweise eine Maschine oder ein Produkt aus der realen Welt, den zugehörigen Zwilling im digitalen Raum sowie Informationen, welche beides miteinander verbindet. Die Daten werden den digitalen Zwillingen mithilfe von Sensoren, IoT-Systemen und zahlreichen anderen Quellen, die mit dem Objekt in der realen Welt in Verbindung stehen, zur Verfügung gestellt. Anschließend setzt man Algorithmen und KI ein, um die gesammelten Daten zu analysieren und daraus Modelle zu entwickeln (Esri, 2021; Grösser, 2018).

Der Datenfluss bei digitalen Zwillingen findet in beide Richtungen automatisch statt (vgl. Abb. 1). Die hieraus resultierenden Ergebnisse beeinflussen die Realität direkt. Im Unterschied dazu basiert ein Digital Shadow zwar auch auf einem automatischen Datenfluss bei der Erstellung des Modells und reagiert auf Änderungen der Realität. Aus den Ergebnissen abgeleitete Änderungen müssen jedoch manuell angestoßen werden. Besteht darüber hinaus kein Online-Datenfluss von Realität zum Modell, spricht man lediglich von einem Digital Model (van der Aalst et al., 2021).

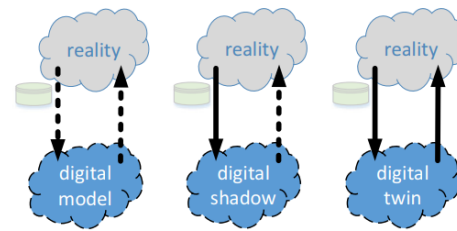


Abbildung 1: Digital Twin, Digital Shadow und Digital Model  
Quelle: (van der Aalst et al., 2021)

Die Anwendungsbereiche für digitale Zwillinge reichen von der Optimierung von Bau- und Infrastrukturprojekten über die personalisierte Medizin und den Automobilbau bis hin zur Luft- und Raumfahrtindustrie. Auch in der Logistik können digitale Zwillinge zur Prozessoptimierung, Effizienzsteigerung und Qualitätsverbesserung eingesetzt werden. Grundsätzlich gibt es drei Arten von digitalen Zwillingen, die unterstützend in den unterschiedlichsten Branchen eingesetzt werden können: digitale Zwillinge für Produkte, digitale Zwillinge für Produktionsprozesse und digitale Zwillinge für Leistungsfähigkeit (IBM, 2023; Siemens, 2019).

Zu den Herausforderungen für die Implementierung von digitalen Zwillingen gehören Datensicherheit, Datenschutz, technische Fehler, Implementierungskosten sowie Schulungsaufwände für die Mitarbeiter im Umgang mit der neuen Technologie. Auch die Komplexität der Systeme spielt in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle: Unternehmen müssen Vorkehrungen treffen, um die Sicherheit und Integrität ihrer Daten zu gewährleisten und die bestmögliche digitale Abbildung zu schaffen (DHL Trend Research, 2019; PwC, 2018).

### RAHMENBEDINGUNGEN

Unternehmen sind bestrebt, ihre Kernkompetenzen und geistiges Eigentum zu schützen. Beispielsweise wollen Produkthersteller i.d.R. ihr Produktdesign sowie sonstige technische Informationen nicht teilen (Uhlenkamp et al., 2020). Eine Studie von PwC zeigt, wie groß die Sorge in Bezug auf die Datensicherheit ist: Dies erweist sich als zentraler Aspekt für viele deutsche Unternehmen, weshalb sie keinen Datenaustausch mit anderen Akteuren eingehen wollen (Pauer et al., 2018). Darüber hinaus befürchten entsprechend der PwC-Studie mehr als die Hälfte der befragten Führungskräfte, durch digitale Kooperation die Kontrolle über die eigenen Daten zu verlieren (Pauer et al., 2018). Entsprechend erweist sich Datensouveränität als weitere Herausforderung und wichtige Rahmenbedingung für Manufacturing-X (VDMA, 2022): Unter Datensouveränität versteht man die „Hoheit eines Dateneigners über die Nutzung der eigenen Daten souverän und exklusiv zu entscheiden“ (Bergs et al., 2020). Dieser Sachverhalt spricht gegen eine Realisierung von Manufacturing-X im Sinne einer monolithischen zentralen Plattform. Ein föderativer Ansatz soll stattdessen sicherstellen, dass Unternehmen die Kontrolle über ihre eigenen Daten behalten und gleichzeitig von den Vorteilen eines gemeinsamen Datenökosystems zu profitieren (VDMA, 2022).

Um einen sicheren und vertrauensvollen Datenaustausch zu gewährleisten, müssen die europäischen rechtlichen Verordnungen und Gesetze eingehalten werden. Hierzu zählen z.B. der EU Data Act, das Vertragsrecht, das Lieferkettengesetz, der Data Governance Act, der Digital Markets Act und das Kartellrecht. Allerdings sind viele rechtlichen Aspekte zum Datenaustausch noch ungeklärt. Daher erweist es sich als relevant, den rechtlichen Entwicklungen hinreichend Aufmerksamkeit zu schenken und sich adäquat an den rechtlichen Rahmen anzupassen (Plattform Industrie 4.0, 2022).

Die Ausrüsterindustrie in der EU umfasst ca. 80.000 Unternehmen, welche eine Vielfalt an heterogenen Produkten produzieren und eine komplexe offene Wertschöpfungsnetzwerk aufweisen (VDMA, 2022). Um Manufacturing-X erfolgreich umzusetzen ist es daher eine besondere Herausforderung, für diese starke Heterogenität einen umfassenden organisatorischen Rahmen zu schaffen und diesen zu orchestrieren (Plattform Industrie 4.0, 2022; VDMA, 2022).

Die Organisationsstruktur von Manufacturing-X muss geprägt sein von Transparenz und Offenheit, sowohl für nationale als auch internationale gegenwärtige und zukünftige Beziehungen. Gerade auch deshalb wird angestrebt, eine Zusammenarbeit mit Catena-X zu ermöglichen. Des Weiteren hat die offene und transparente Organisationsstruktur von Manufacturing-X zum Ziel, die aktive Beteiligung und Mitgestaltung der beteiligten und interessierten Unternehmen, politischen Institutionen, Verbände und wissenschaftlichen Akteure bei der Entwicklung der Initiative zu fördern (Plattform Industrie 4.0, 2022).

In Bezug auf die Zusammenarbeit sind Monopolbildungen zu verhindern, Wettbewerb zu fördern und Chancengleichheit zu gewährleisten (VDMA, 2022). Ein Austausch von hochsensiblen Informationen basiert auf Vertrauen und sollte bei souveränen Partnern ohne äußere Zwänge erfolgen (VDMA, 2022).

Analog zu Catena-X müssen die Stakeholder von Manufacturing-X eine organisatorische Basis schaffen. Entsprechende Strukturen wie bei Catena-X, beispielsweise in Form von Onboarding-Partnern für Coachings, Schulungen etc., existieren bei Manufacturing X jedoch nicht. Aufgrund der Heterogenität der beteiligten Unternehmen und der hohen Anzahl erweist es sich als unsicher, ob eine solche Konstellation sich etablieren wird (Catena-X Automotive Network Konsortialprojekts, 2023).

Neben rechtlichen und organisatorischen Rahmenbedingungen gibt es bei der Implementierung von digitalen Zwillingen auch technische Voraussetzungen, die erfüllt werden müssen. Diese lassen sich hierarchisch in Maschinenebene, Datenebene und Analyseebene einteilen. Zusätzlich gibt es noch technische Rahmenbedingungen allgemeiner Art, die keiner einzelnen Ebene zugeordnet werden können (Neugebauer et al., 2023).

Auf Maschinenebene ist vor allem die Verwendung von IoT-Geräten bzw. das Ausstatten vorhandener Geräte und Produkte mit Sensorik und Sendeelementen von großer Bedeutung. Die Grundlage digitaler Zwillinge bilden

Daten, die direkt an den physischen Objekten erfasst werden müssen. Mithilfe der Sendeelemente können die Daten kabelgebunden oder kabellos an die Dateninfrastruktur gesendet werden (Fischer, 2020; Human, 2020; Neugebauer et al., 2023).

Die Verwaltung der erfassten Daten findet auf der Datenebene statt. Die benötigte Dateninfrastruktur kann sich hierbei aus einem Cloud- und einem On-Premise-Anteil zusammensetzen (Neugebauer et al., 2023). Zusätzlich sollten bereits bestehende System, wie ERP, PDM, PLM und CAD in den Datenfluss eingebunden werden, um die Daten der physischen Objekte mit Umgebungs- und Prozessdaten zu verbinden (exone.de, 2023). Ein Datenmanagement-Tool sowie ein Registry-Dienst helfen dabei, die Daten für die Analyse vorzubereiten und den Überblick über die Daten zu behalten (Schnicke und Kuhn, 2020). Ein Registry-Dienst ist notwendig, um die dynamischen Systeme zu verwalten. Der Dienst dient als zentrales Verzeichnis, in dem Informationen über Verwaltungsschalen und Teilmodelle, wie beispielsweise Metadaten, Zugangspunkte und Schnittstellenbeschreibungen gespeichert sind. Es ermöglicht den Zugriff und die Verwaltung sowie das Durchsuchen digitaler Zwillinge anhand bestimmter Kriterien, beispielsweise Tags, Eigenschaften oder Zeiträume (Catena-X, 2022; Schnicke und Kuhn, 2020).

Der Nutzen aus der großen Datenmenge soll sich auf der Analyseebene vollziehen. Hier werden die Daten auf Benutzeroberflächen, wie beispielsweise Tablets, Smartphones und AR/VR-Brillen für den Menschen visualisiert und mithilfe von Software aufbereitet. Optimierungs-, Simulations-, Prognose-, Reporting- und Überwachungsprogramme verwenden die Daten, um spezifische Analysen zum Verhalten der Maschinen und Produkte zu erstellen und daraus im weiteren Verlauf einen Nutzen zu ziehen (Fischer, 2020; Neugebauer et al., 2023).

Betrachtet man die allgemeinen technischen Rahmenbedingungen, ist es wichtig, Schnittstellen zwischen den Ebenen und auch zwischen den Unternehmen zu schaffen, über die die Daten in einem einheitlichen Datenformat übertragen werden können. Die horizontale und vertikale Kommunikation zwischen Maschinen kann auf Basis der „Produktionssprache“ OPC UA stattfinden. Die standardisierte Darstellung digitaler Zwillinge kann mithilfe sogenannter Verwaltungsschalen erfolgen (vgl. Abb. 2). Diese fungieren als „genormter Datenstecker“ zwischen Wertschöpfungspartnern und bieten eine harmonisierte Schnittstelle zum gesamten Produktionssystem, wodurch der Datenaustausch erleichtert werden soll (Plattform Industrie 4.0, 2022).

Verwaltungsschalen umschließen ein Objekt und ermöglichen das Referenzieren von Teilmodellen dieses Objekts, welche unterschiedliche Sichten des digitalen Zwillinges darstellen. Hierdurch wird die Implementierung verschiedener Versionen eines digitalen Zwillinges ermöglicht. Die Verwaltungsschale verknüpft Eigenschaften und Funktionen mit semantischen Informationen, um die Bedeutung von Daten zu definieren. Dies führt zu einer einheitlichen Informationsgrundlage, auch

wenn verschiedene Hersteller unterschiedliche Feldnamen für Komponenten verwenden. Die Nutzer selbst sind für den Inhalt der Teilmodelle verantwortlich und können verschiedene, ihren Bedürfnissen entsprechende, Arten von Teilmodellen definieren (Schnicke und Kuhn, 2020).



Abbildung 2: Verwaltungsschale  
Quelle: (Schnicke und Kuhn, 2020)

## AUSGESTALTUNG EINES DIGITALEN ZWILLINGS FÜR MANUFACTURING-X

### Einsatz von digitalen Zwillingen

Manufacturing-X bietet die Möglichkeit, digitale Zwillinge zu verwalten und anderen teilnehmenden Unternehmen zu Verfügung zu stellen. Im Folgenden werden Möglichkeiten für die Anwendung digitaler Zwillinge im Kontext von Manufacturing-X aufgezeigt.

Nach erfolgter Implementierung kann damit begonnen werden, Daten zu sammeln und daraus einen digitalen Zwilling zu erstellen. Beim Speichern der Daten sollte man einen hybriden Ansatz wählen. Entsprechend sind statische Daten in der Cloud und dynamische Daten initial On-Premise speichern, um dauerhaft große Datenströme zu vermeiden und das System so nicht zu überlasten. Allerdings ergibt es Sinn, dynamische Daten in regelmäßigen Abständen in der Cloud zu speichern, um Datenverluste bei Ausfällen zu vermeiden.

Die intern gespeicherten Daten der digitalen Zwillinge sollten in festgelegten Abständen in dem für andere Unternehmen einseharen Datenraum registriert werden. Hierbei kann jedes Unternehmen einen eigenen souveränen Datenraum betreiben und in diesem seine Daten den teilnehmenden Unternehmen zu Verfügung stellen. Damit dieses Datenökosystem funktioniert, ist es notwendig, eine einfache und durchgängige Datenvernetzung sowie die Bereitschaft zum Teilen von Daten sicherzustellen (Plattform Industrie 4.0, 2023). Darüber hinaus bietet das Einbinden von Suchmaschinenanbietern für Manufacturing-X Services die Möglichkeit, das Datenökosystem auf Basis von Stichwörtern nach digitalen Zwillingen zu durchsuchen (VDMA, 2022).

Grundsätzlich steigt mit der Menge der verwendeten Daten auch die Qualität der digitalen Zwillinge und somit die Genauigkeit der Analysen, die mithilfe dieser erstellt werden können. Eine Notwendigkeit für den Erfolg von Manufacturing-X und dem damit verbundenen Datenaustausch zwischen Unternehmen ist die Verwendung einheitlicher Standards beim Speichern und Verarbeiten der

Daten. Die für diesen Anwendungsfall beste Möglichkeit dies sicherzustellen, ist die Verwendung von Verwaltungsschalen. Diese speichern alle Teilmodelle eines Assets ab. Beispiele für mögliche Teilmodelle sind in Abbildung 3 zu sehen.

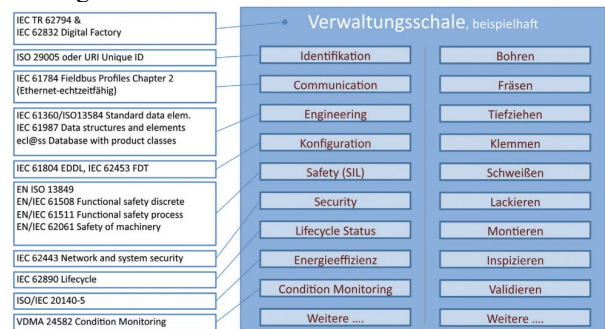


Abbildung 3: Mögliche Teilmodelle einer Verwaltungsschale  
Quelle: (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, 2016)

Die Teilmodelle sind dann als Tabellen aufgebaut und speichern alle wichtigen Daten, die im Anschluss als einheitliches Datenformat mit den anderen Unternehmen geteilt werden können. Das Teilmodell „Energieeffizienz“ ist beispielhaft in Abbildung 4 beschrieben.

Hierarchy	ID	Preferred Name	Definition	Unit of measure	Merkmalsdefinition		Merkmalsausprägung		Expression semantic	Expression logic	Views	B/D/ F/A/-	Contents
					Data type	Value list	Value	Expression semantic					
←	AAB010	Electrical energy	This is a group of properties concerning about electrical energy consumption.	-	-	-	-	-	-	-	Performance	-	-
I	AAB011	Electrical consumption actual	Current, actual electrical consumption.	W	REAL	0..*	93.6 [W]	Measurement	Equal	Performance	-	-	-
-I	AAB012	Electrical consumption cumulative energy	Integrated electrical consumption over time.	Wh	REAL	0..*	118.86 [Wh]	Measurement	Equal	Performance	-	-	-
-I	AAB013	Electrical consumption cumulative start date	Date and time the integration of electrical consumption was started.	-	UTC Date & Time	n/a	2002-05-30T09:30:10Z	Measurement	Equal	Performance	A	-	For XML UTC time format see: <a href="http://www.w3schools.com/xml/schema_dtypes_date.asp">http://www.w3schools.com/xml/schema_dtypes_date.asp</a>
←	AAB020	Pneumatic energy	This is a group of properties concerning about pneumatic energy consumption.	-	-	-	-	-	-	-	Performance	-	-
-I	AAB021	Actual supply pressure	Supply pressure of the asset sensed at the inlet of the asset.	bar	REAL	0..*	8 [bar]	Measurement	Equal	Performance	-	-	-
-I	AAB022	Pneumatic consumption actual	Current, actual pneumatic consumption.	l/h	REAL	0..*	212 [l/h]	Measurement	Equal	Performance	-	-	-
-I	AAB023	Pneumatic consumption cumulative energy	Integrated pneumatic consumption over time.	l	REAL	0..*	3424 [l]	Measurement	Equal	Performance	-	-	-
-I	AAB024	Pneumatic consumption cumulative start date	Date and time the integration of pneumatic consumption was started.	-	UTC Date & Time	n/a	2002-05-30T09:30:10Z	Measurement	Equal	Performance	-	-	-

Abbildung 4: Teilmodell "Energieeffizienz"  
Quelle: (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, 2016)

Um sicherzustellen, dass den Unternehmen auch beim Teilen von Teilmodellen ihrer Assets die volle Kontrolle über ihre Daten erhalten bleibt, sollten Unternehmen wählen können, welche Teilmodelle eines Assets preisgegeben werden. Innerhalb eines Teilmodells können zudem Felder, die nicht als „mandatory“ gekennzeichnet sind, außen vor gelassen werden, um bestimmte Daten zu schützen. Als Konsequenz dürfen diese Unternehmen allerdings auch keinen Zugriff auf die Teilmodelle und Felder innerhalb der Teilmodelle haben, die sie selbst nicht im Datenökosystem geteilt haben. Dies führt dazu, dass Unternehmen sehr genau abwägen müssen, welche Daten

sie teilen und welche Daten sie für sich behalten wollen. Gleichzeitig motiviert es Teilnehmer viele Daten preiszugeben, um selbst auch den größtmöglichen Nutzen aus der Zusammenarbeit in Manufacturing-X zu ziehen.

### Ausgewählte Geschäftsmodelle

Nutzen durch digitale Zwillinge entstehen insbesondere dann, wenn die erzeugten Daten analysiert und für Simulationen und Vorhersagen verwendet werden. Der konkrete Mehrwert variiert stark zwischen den Unternehmen und hängt von verschiedenen Faktoren ab. Nachfolgend werden potenzielle Geschäftsmodelle vorgestellt, die sich i.d.R. mithilfe von digitalen Zwillingen erschließen lassen:

grund der gesammelten Echtzeitdaten und deren Abgleich Vorhersagen über drohende Störungen treffen. Dies ermöglicht proaktive Maßnahmen wie z.B. den rechtzeitigen Austausch von Verschleißteilen. Wartungsintervalle lassen sich mithilfe der Daten des Condition Monitorings, welche mit dem digitalen Zwilling verknüpft sind, am tatsächlichen Bedarf orientieren. Collaborative Condition Maintenance ermöglichen einen koordinierten Einsatz von Instandhaltungsmaßnahmen über mehrere Partner hinweg. Der Fokus liegt hierbei auf dem Austausch von Wissen, Ressourcen und Fachkenntnissen, um die Instandhaltungsprozesse zu optimieren (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2020; Bundes-

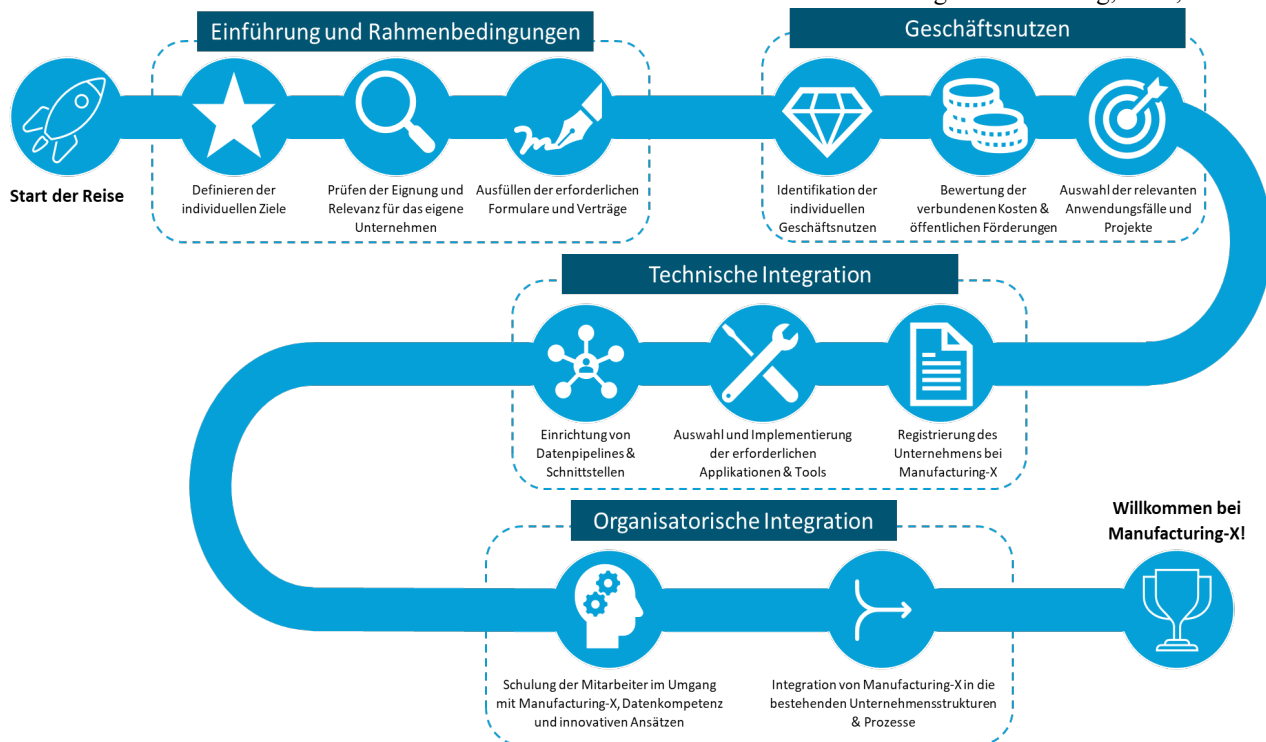


Abbildung 5: Manufacturing-X Phasenplan  
Quelle: Eigene Darstellung

- Virtueller Marktplatz für den Handel mit digitalen Zwillingen: Ein wesentlicher Aspekt besteht darin, dass die Eigentümer der digitalen Zwillinge die volle Kontrolle über ihre Daten behalten und eigens darüber entscheiden können, wie ihre Daten genutzt werden (VDMA, 2022).
- CO<sub>2</sub>- und ESG-Monitoring mithilfe des digitalen Produktpasses: Der wachsende Umfang an Berichtspflichten für Hersteller von Produkten, wie sie beispielsweise im Lieferkettengesetz oder dem Product Carbon Footprint (PCF) festgelegt sind, erstreckt sich zunehmend über die gesamte Wertschöpfungskette. In diesem Zusammenhang kann die Einführung eines digitalen Produktpasses hilfreich sein, um relevante digitale Produktdaten zu generieren und zu managen.
- Predictive Maintenance und Collaborative Condition Monitoring: Digitale Zwillinge können auf-

- grund der gesammelten Echtzeitdaten und deren Abgleich Vorhersagen über drohende Störungen treffen. Dies ermöglicht proaktive Maßnahmen wie z.B. den rechtzeitigen Austausch von Verschleißteilen. Wartungsintervalle lassen sich mithilfe der Daten des Condition Monitorings, welche mit dem digitalen Zwilling verknüpft sind, am tatsächlichen Bedarf orientieren. Collaborative Condition Maintenance ermöglichen einen koordinierten Einsatz von Instandhaltungsmaßnahmen über mehrere Partner hinweg. Der Fokus liegt hierbei auf dem Austausch von Wissen, Ressourcen und Fachkenntnissen, um die Instandhaltungsprozesse zu optimieren (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2020; Bundes-
- ministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, o. D.).
- Manufacturing-as-a-Service: Hierdurch können Unternehmen ungenutzte Kapazität ihre Fertigungssysteme als Service an Dritte anbieten (VDMA, 2022). Ein digitaler Zwilling ermöglicht es hierbei potenziellen Kunden, die verfügbaren Ressourcen und Fähigkeiten des Fertigungssystems virtuell zu erkunden und ihre Produktionsanforderungen entsprechend anzupassen.
- Equipment-as-a-Service: In diesem Geschäftsmodell erhalten Betreiber von Produktionsmitteln eine Lizenz zur Nutzung, anstatt diese zu erwerben (Pay-per-Use-Geschäftsmodelle). Dies vermeidet hohe Anfangsinvestitionen und schafft höhere Flexibilität. Gleichzeitig führt dieses Modell zu einer kontinuierlichen Einkommensquelle für den Hersteller oder Anbieter des Services. Um eine unterbrechungsfreie Nutzung zu gewährleisten und Wartungen vorausschauend zu planen und durchzuführen,

ist es erforderlich, dass die Eigentümer der Produktionsmittel Daten über den aktuellen Zustand erfassen und auswerten können (VDMA, 2022). Dies lässt sich durch einen digitalen Zwilling bewerkstelligen.

### **Vorgehensmodell zur Implementierung**

Der nachfolgend vorgestellte Phasenplan (vgl. Abb. 5) hat zum Ziel Interessenten einen Leitfaden für die Implementierung von Manufacturing-X an die Hand zu geben. Das Konzept orientiert sich an Catena-X und berücksichtigt spezifische Rahmenbedingungen in der Manufacturing-X Domäne wie z.B. die Anzahl und Heterogenität der Teilnehmer (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2023a).

#### **1. Einführung der Rahmenbedingungen:**

In der ersten Phase definieren die Nutzer ihre strategischen Ziele und begutachten die Rahmenbedingungen für die Teilnahme an Manufacturing-X. Zusätzlich prüfen sie die Eignung und Relevanz von Manufacturing-X für das eigene Unternehmen. Darüber unterzeichnen sie die zugehörigen Verträge.

Den Betreibern der Manufacturing-X Plattform obliegt die Aufgabe, umfassende Eingangsinformationen bereitzustellen. Es steht ein zentrales Portal mit Unterstützungsmaterialien und Ressourcen zur Verfügung, um den Einstieg in Manufacturing-X zu erleichtern. Darüber hinaus liegt ein allgemeiner Standardvertrag vor, der den aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen entspricht und der die Bedürfnisse und Anforderungen der Teilnehmer berücksichtigt.

#### **2. Geschäftsnutzen:**

In der zweiten Phase identifizieren die Nutzer den individuellen Geschäftsnutzen und die Mehrwerte für ihr Unternehmen durch die Teilnahme an Manufacturing-X. Weiterhin analysieren sie die damit verbundenen Kosten und mögliche öffentliche Förderungen. Sie wählen relevante Anwendungsfälle und Projekte aus, die im Rahmen von Manufacturing-X umgesetzt werden sollen.

Die Manufacturing-X Betreiber stellen umfassende Informationen über mögliche Anwendungsfälle und Potenziale von Manufacturing-X bereit. Es werden auch Informationen und Kriterien zur Bewertung von Kosten und aktuellen öffentlichen Förderungsmöglichkeiten bereitgestellt. Zusätzlich sollten Richtlinien und Empfehlungen zur Identifizierung und Umsetzung der Anwendungsfälle bereitgestellt werden. Dabei werden etablierte erfolgreiche Einsätze als Best Practices ausgewiesen.

#### **3. Technische Integration:**

Zusätzlich zur Registrierung bei Manufacturing-X wählen die Nutzer die erforderlichen Applikationen und Tools aus. Diese werden implementiert und dienen als Grundlage für die Umsetzung der Anwendungsfälle. Darüber hinaus erfolgt die Einrichtung von Datenpipelines und Schnittstellen zur sicheren und effizienten Datenübertragung.

Die Manufacturing-X Betreiber halten einfache und benutzerfreundliche Tools und Formulare zur Registrierung und Integration neuer Teilnehmer bereit. Der Onboarding-Prozess ist geprägt von Automatisierung und Standardisierung. Es steht eine sichere und skalierbare Dateninfrastruktur für den Datenaustausch und die Zusammenarbeit zur Verfügung. Zusätzlich werden Schulungen in Form von Videos und Anleitungen zur reibungslosen Integration angeboten.

#### **4. Organisatorische Integration:**

Die Nutzer etablieren eine Kultur des Datenaustauschs und der Zusammenarbeit innerhalb ihres Unternehmens. Zusätzlich stellen sie die Integration von Manufacturing-X in die bestehenden Unternehmensstrukturen und Prozesse sicher. Außerdem sorgen sie für die erforderlichen Skills bei ihren Mitarbeitern für den Umgang mit Manufacturing-X, Datenkompetenz und innovativen Ansätzen. In dieser vierten Phase stellen die Manufacturing-X Betreiber Leitlinien und Best Practices für die organisatorische Integration von Manufacturing-X in die Unternehmensstrukturen der Teilnehmer bereit. Darüber bieten sie Schulungen in Form von Videos oder Onlineworkshops an, um eine erfolgreiche Integration zu unterstützen.

### **Schwerpunkt technische Integration**

Im Folgenden wird noch detaillierter auf die Phase der technischen Integration eingegangen. In diesem Zusammenhang werden auch Technologien erörtert, die von Nutzern zur Implementierung von Manufacturing X in Betracht gezogen werden können. Aufgrund des großen Anbieterspektrums, insbesondere im Cloud-Bereich, handelt es sich um eine exemplarische Auswahl, von der im Falle von spezifischen Anforderungen eines Unternehmens abgewichen werden kann.

#### **Austausch von Echtzeitdaten mittels OPC UA**

OPC UA („Open Platform Communications Unified Architecture“) eignet sich als Standard für den Transport von Echtzeitdaten, da es sich innerhalb der Fertigungsindustrie bereits als Hersteller- und plattformunabhängiges Kommunikationsprotokoll etabliert hat. Die Herstellerunabhängigkeit von OPC UA ermöglicht eine nahtlose Integration bzw. Verknüpfung von Maschinen unterschiedlicher Hersteller.

In der folgenden Architekturbetrachtung wird davon ausgegangen, dass es sich um moderne Maschinen handelt, die bereits über eine OPC UA-Schnittstelle verfügen. Folglich entfällt die Notwendigkeit, zusätzliche Adapter oder Gateways für die Implementierung einer OPC UA-basierten Kommunikation zu installieren. Durch die Herstellerunabhängigkeit von OPC UA wird eine Abhängigkeit zu großen Softwareunternehmen vermieden, was ansonsten häufig der Fall ist, insbesondere bei Kommunikationssystemen, die auf COM-Technologien basieren. Diese Unabhängigkeit erhöht die Flexibilität und Autonomie innerhalb der Systemarchitektur. OPC UA bietet ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten, was die

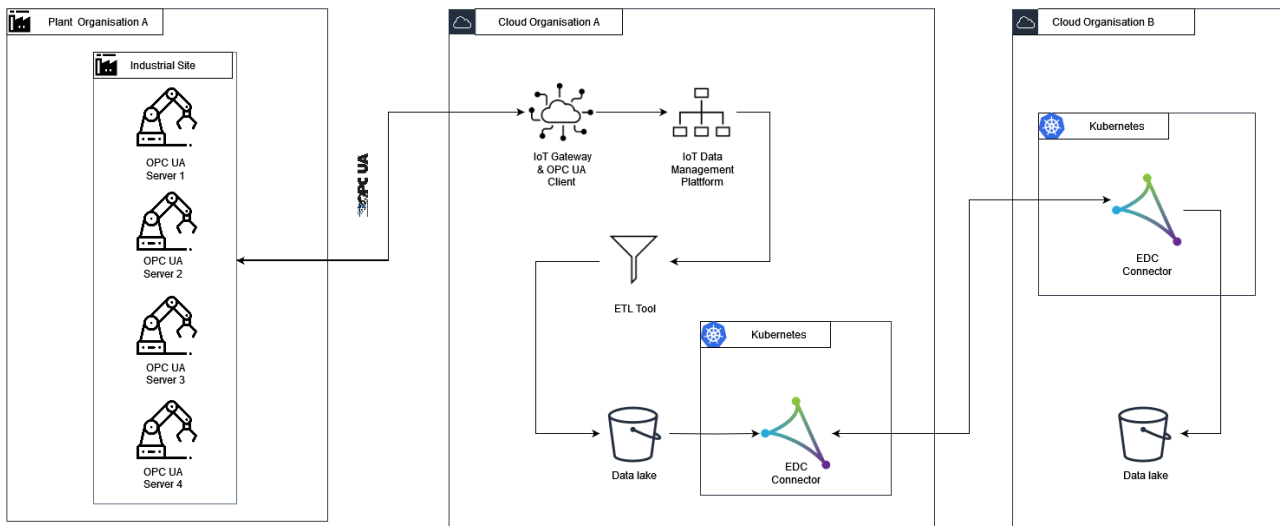


Abbildung 6: Beispiel Architektur  
Quelle: Eigene Darstellung

Interoperabilität fördert. Zusätzlich zeichnet sich OPC UA durch eine hohe Skalierbarkeit aus (IPC2U, o. D.; OPC Router, o. D.).

Darüber hinaus gewährleistet OPC UA in industriellen Umgebungen wie der Fertigungsindustrie eine sichere Datenübertragung durch die Implementierung eines umfassenden Sicherheitskonzepts. Dieses Konzept umfasst Authentifizierung, Autorisierung, Verschlüsselung und die Sicherstellung der Datenintegrität durch den Einsatz von Zertifikaten (ascolab, o. D.; OPC Unified Architecture, 2018). Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) hat in den Jahren 2015 und 2021 Sicherheitsanalysen für OPC UA veröffentlicht, die zwei Sicherheitsmodi aufzeigen: Sign und Sign&Encrypt. Der Hauptunterschied besteht darin, dass Sign&Encrypt eine erweiterte Sicherheit bietet, da Nachrichten nicht nur signiert, sondern auch verschlüsselt werden. Die Schlussfolgerung aus diesen Sicherheitsanalysen lautet, dass OPC UA in Verbindung mit Sign&Encrypt eine effektive Abwehr gegen die meisten Bedrohungen darstellt, mit Ausnahme von Angriffen wie 'Denial of Service' und 'Server Profiling', gegen die nur ein begrenzter Schutz geboten werden kann (vom Dorp et al., 2022).

OPC UA unterstützt zwei Kommunikations-mechanismen: Client/Server und Publisher/Subscriber. Die Client/Server Kommunikation stellt die „traditionelle“ Kommunikation zwischen zwei Parteien dar. Dabei senden einer oder mehrere OPC-Clients eine Anfrage an den OPC UA-Server und erhalten von diesem eine Antwort. Die Publisher/Subscriber-Kommunikation hingegen basiert auf einer indirekten Interaktion über einen Message Queue Broker. Ein Publisher stellt dabei Informationen in einem Nachrichtenkanal zur Verfügung, den die Subscriber „abonnieren“ können, um die Daten zu erhalten, sobald der Publisher sie veröffentlicht.

Das nachfolgende Architekturmodell basiert auf der Entscheidung, ein OPC UA Client/Server-Modell zu implementieren. Es beruht auf der Annahme, dass lediglich ein Dienst die Daten von den Maschinen abfragt. Die Unternehmensarchitektur kann aus einem oder mehreren OPC

UA-Servern bestehen. Das Gegenstück hierzu ist der OPC UA Client. OPC UA-Server sind die Einheiten, die Daten generieren und bereitstellen. In der vorliegenden Modellierung sind dies die Maschinen, die Sensordaten erzeugen und bereitstellen. Der OPC UA-Client hingegen ist die Software oder das Dienstprogramm, das die Sensordaten vom OPC UA-Server abrufen und weiterverarbeitet, z.B. ein Gateway. Bezüglich der ausgetauschten Daten bietet OPC UA die Möglichkeit, Daten semantisch zu beschreiben. Das bedeutet, dass neben „rohen“ Datenwerten zusätzliche Informationen wie Herkunft, Format und ähnliches bereitgestellt werden können. Dies kann zu einer verbesserten Datenanalyse und -nutzung führen, da die Daten mehr Informationen beinhalten und verständlicher sind, was das Risiko von Fehlinterpretationen reduziert (IPC2U, o. D.; OPC Router, o. D.; Phoenix Contact, o. D.; OPC Unified Architecture, 2018; Siemens, o. D.). Für die potenzielle Implementierung von Manufacturing X ist eine Edge-to-Cloud-Architektur zu empfehlen. Wie diese im Detail aussieht, hängt zukünftig von IPCEI-CIS ab, einem Förderprogramm, das für die Entwicklung fortschrittlicher Technologien für ein Multi-Provider Cloud-Edge-Continuum konzipiert ist (Plattform Industrie 4.0, 2022). Zusätzlich sind die spezifischen Bedürfnisse und Anforderungen eines Unternehmens für die Architektur ausschlaggebend. Unabhängig von diesen Faktoren, bietet sich die folgende generische Edge-to-Cloud-Architektur an (vgl. Abb. 6).

#### Generische Manufacturing X Architektur

In einem Unternehmen fungieren Maschinen, die Sensordaten erzeugen, als OPC UA-Server. In dem Beispielmodell existieren vier Maschinen und somit vier individuelle OPC UA-Server. Diese Server kommunizieren mit einem in der Cloud betriebenen IoT-Gateway, das gleichzeitig als OPC UA-Client dient. Abhängig von den spezifischen Anforderungen kann entweder ein Client/Server- oder ein Publisher/Subscriber-Kommunikationsmodell ausgewählt werden. In dem Modell ist ein Client/Server-Modell modelliert, da das IoT-Gateway die

einzigste Komponente ist, die Daten abrufen. Das IoT-Gateway fungiert als Schnittstelle, die die Daten von den Edge-Geräten abrufen und an ein Datenmanagement-Tool weiterleitet. Dieses in der Cloud betriebene Tool sammelt, verarbeitet und speichert die Daten und kann für eine erste Datenbereinigung und Analyse genutzt werden. Das ETL-Tool (Extraction, Transformation, Load) ist für das Extrahieren, Transformieren und Weiterleiten der Daten an den Data Lake verantwortlich. Über dieses können die Daten bei Bedarf in das erforderliche Format umgewandelt werden. Der Data Lake dient als zentrale Speicherstelle für alle Daten und kann flexibel für Analysen oder maschinelles Lernen genutzt werden. Er ist mit einem Eclipse Dataspace Connector des Eclipse Dataspace Components Frameworks verbunden, welcher in einem Kubernetes-Cluster betrieben wird, um einen sicheren und kontrollierten Datenaustausch mit anderen Unternehmen zu ermöglichen (AWS Workshop Studio, o. D.; Eclipse Foundation, o. D.; European Commission, 2023; Kolodziej & Vazquez, 2023; Sodabathina et al., 2022).

#### Einheitliches Datenformat

OPC UA unterstützt speziell drei Encoding-Formate für das Codieren und Decodieren von Daten: OPC UA Binary, XML und JSON. Diese Formate werden von OPC UA zur Datenübertragung und -speicherung bereitgestellt. Es ist somit möglich, Daten entweder binär oder als Text in Form von XML oder JSON zu übertragen. Alle drei Formate bieten sich als ein einheitliches Datenformat an. Insbesondere XML und JSON sind weit verbreitete Formate und werden von vielen Anwendungen akzeptiert. Das binäre Format von OPC UA ist ein spezielles, für die maximale Nutzung von OPC UA konzipiertes Format. Es ist vor allem auf schnelles Codieren und Decodieren ausgelegt. Unabhängig von der gewählten Option sollten keine anderen Datenformate als die genannten drei in Betracht gezogen werden, um mögliche Komplikationen oder Fehler bei Transformationen zu vermeiden (OPC Foundation, o. D.a, o. D.b, o. D.c, o. D.d).

#### Tools

Bei der Wahl der Cloud-Umgebung, des Datenmanagement-Tools, des ETL-Tools und des Data Lakes besitzt jedes Unternehmen individuelle Präferenzen und Anforderungen, die es zu berücksichtigen gilt. Zudem muss die Entscheidung auf der Grundlage der aktuellen IT-Architektur getroffen werden, um die bestmögliche Kompatibilität und Integration zu gewährleisten. Grundsätzlich sollten alle gewählten Tools Eigenschaften wie Skalierbarkeit, Flexibilität, Sicherheit, Verfügbarkeit und eine breite Unterstützung für Cloud-Plattformen aufweisen.

Für Unternehmen, die von Grund auf neu starten, können Cloud-Umgebungen wie Amazon Web Services (AWS) oder Microsoft Azure in Betracht gezogen werden. AWS bietet Dienste wie beispielsweise AWS Glue für Datenmanagement und ETL-Aufgaben sowie AWS S3 als Data Lake. Microsoft Azure bietet Dienste wie Azure Data Factory für Datenmanagement und ETL und Azure Data

Lake Storage als Speicherlösung (Amazon Web Services, Inc., o. D.a, o. D.b; Microsoft, o. D.a, o. D.b).

#### Eclipse Data Space Connector

Der in der Architektur verwendete Eclipse Dataspace Connector ist ein Bestandteil des Eclipse Dataspace Component Frameworks, das von der Eclipse Foundation entwickelt wird. Es handelt sich um ein Open-Source Framework, das einen sicheren und kontrollierten Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Parteien ermöglicht. Dabei wird das Konzept des International Data Spaces (IDS) implementiert, welches regelt, wie ein sicherer Datenaustausch zwischen mehreren Parteien innerhalb eines Datenraums realisiert werden kann. Ein wesentlicher Vorzug des Eclipse Dataspace Connectors ist seine Fähigkeit, automatische Vertragsverhandlungen durchzuführen. Es ist erwähnenswert, dass der Eclipse Dataspace Connector auch Teil der Projekte GAIA-X und Catena-X ist (Catena-X Automotive Network Konsortialprojekts, 2022; Eclipse Foundation, o. D.; European Commission, 2023; Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik ISST; Kanal, 2022; Kolodziej & Vazquez, 2023).

#### **Schwerpunkt organisatorische Integration**

Wie bereits erwähnt sind Unternehmen sehr stark daran interessiert ihre Kernkompetenzen und geistiges Eigentum zu schützen (Uhlenkamp et al., 2020). Daher besteht eine große Herausforderung für Manufacturing-X darin, Unternehmen dazu zu motivieren, aktiv ihre Daten zu teilen, insbesondere wenn es sich um vertrauliche Informationen handelt. Um dieser Herausforderung zu begegnen, wird nachfolgend ein Anreizsystem vorgestellt, das Unternehmen motivieren soll, ihre Daten aktiv mit dem Datenökosystem von Manufacturing-X zu teilen. Bei der Entwicklung dieses Anreizsystems ist auf Erfahrungen aus anderen Bereichen, wie zum Beispiel Gaming oder Dating Plattformen, Bezug genommen worden.

Eine häufige Grundlage für digitale Anreizsysteme bildet die Einführung eines Krypto Token. Diesen können die Teilnehmer von Manufacturing-X nicht käuflich erwerben, sondern nur als eine Art Belohnung erhalten, wobei deren Wert durch die Menge und Qualität der geteilten Daten bestimmt wird. Die Tokens lassen sich über eine Blockchain-Plattform wie Polygon automatisch an Unternehmen ausgeben. Unternehmen können die erhaltenen Tokens dann dazu nutzen, um detailliertere Daten zu kaufen und freizuschalten oder andere Vorteile zu erhalten (bspw. Steuererleichterungen, Fördergelder, etc.). Dabei muss jedoch erwähnt werden, dass anfallende GAS-Fees sich hierbei als problematisch erweisen können.

Auf der Grundlage der Krypto-Token lässt sich eine Rangliste erstellen, ähnlich wie bei vielen Videospiele. Die Unternehmen können auf Grundlage der Anzahl vorhandener Krypto-Token in ihren Wallets in verschiedene Ränge eingestuft werden, wobei die Rangliste z.B. vierteljährlich zurückgesetzt wird. Als Konsequenz haben Unternehmen nur Zugriff auf die Daten von anderen Teil-



nehmern, welche sich im gleichen Rang oder darunter befinden. Eine Voraussetzung für den Einsatz besteht darin, dass die Krypto Wallets der Unternehmen bei Manufacturing-X registriert sein müssen, um die Gesamtanzahl Ihrer Krypto Tokens einsehen zu können. Diese Registrierung ließe sich als Voraussetzung für die Teilnahme an Manufacturing-X festlegen. Eine mögliche Herausforderung besteht hierbei darin, den Unternehmen einen Anreiz zu bieten, eine hohe Platzierung in der Rangliste anzustreben. In diesem Zusammenhang lässt sich argumentieren, dass eine hohe Platzierung die Sichtbarkeit eines Unternehmens erhöht und somit potenziell neue Geschäftsmöglichkeiten eröffnet.

In Hinblick auf die Datensouveränität, die eine zentrale Rolle in Manufacturing-X spielt, haben Unternehmen die Möglichkeit, ihre eigenen Daten zu klassifizieren und festzulegen, die als vertraulich oder nicht vertraulich gelten. Um Unternehmen zu motivieren, auch vertrauliche Daten zu teilen, ließe sich ein Ansatz aus der Dating-App Lovoo adaptieren: Dort können Nutzer erst die Bilder anderer Teilnehmer sehen, wenn sie selbst ausreichend eigene Bilder hochgeladen haben. Entsprechend bestünde der Ansatz in Manufacturing-X darin, dass nur Unternehmen, die ihre eigenen vertraulichen Daten geteilt haben, Zugang zu den vertraulichen Daten anderer Unternehmen erhalten. Eine potenzielle Herausforderung besteht darin, dass Unternehmen versucht sein könnten, absichtlich ihre Daten vertraulicher zu klassifizieren, um Zugang zu den vertraulichen Daten anderer Teilnehmer zu erhalten. Um diesem Problem entgegenzuwirken, könnte eine Abstimmung anderer Unternehmen über die Richtigkeit der Klassifizierung eingeführt werden.

Manufacturing-X bietet die Möglichkeit, einen virtuellen Marktplatz für den Handel mit Daten zu etablieren (VDMA, 2022). Auf diesem Marktplatz können Unternehmen ihre Daten verkaufen und dadurch einen direkten monetären Anreiz erhalten, ihre Daten zu teilen. Diese Möglichkeit schafft eine Win-Win-Situation, da Unternehmen durch den Verkauf ihrer Daten zusätzlich Umsatz generieren können, während andere Unternehmen Zugang zu wertvollen Daten erhalten, um diese für ihre eigenen Zwecke zu nutzen.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass die Manufacturing-X Betreiber den Nutzern über eine benutzerfreundliche Website oder Software hochwertige Analysefunktionen zur Verfügung stellen. Insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU), die möglicherweise nicht über die erforderlichen Ressourcen und Fachkenntnisse für die Datenanalyse verfügen, kann dies von hoher Attraktivität sein. Angesichts dessen, dass viele potenzielle Teilnehmer von Manufacturing-X spezialisierte KMU sind, repräsentieren Analysefunktionen einen potenziellen Mehrwert. Optionale könnte die Freischaltung der Analysefunktionen durch die Krypto Token erfolgen. Dadurch würde nicht nur ein Anreiz für KMU geschaffen, sondern auch ein indirekter Anreiz zum Teilen von Daten, da der Erhalt von Krypto-Token an das Teilen von Daten gekoppelt ist.

## FAZIT

Bei einem digitalen Zwilling handelt es sich um eine virtuelle Repräsentation eines physischen Objekts, Systems oder Prozesses. Er lässt sich für Simulationen, Analysen und Optimierungen von realen Objekten oder Systemen verwenden. Im Rahmen von Manufacturing-X vermag es ein digitaler Zwilling, Effizienz, Produktivität und Nachhaltigkeit von Fertigungsprozessen zu verbessern. Manufacturing-X baut auf Erfahrungen von Initiativen wie Catena-X auf, besitzt jedoch Spezifika wie eine große Anzahl und Heterogenität an potenziellen Teilnehmern. Entsprechend erweist sich eine Analyse der Rahmenbedingungen als notwendig für eine nachhaltige Nutzung. Hierzu zählen zunächst die Gewährleistung von Datensicherheit, Datensouveränität, vertrauensvollen Datenaustausch und rechtliche Rahmenbedingungen. Darüber hinaus sind jedoch auch technische und organisatorische Herausforderungen zu meistern. Es zeigt sich, dass sich eine föderative Struktur mit souveränen Datenräumen als ein wichtiger Bestandteil des Datenökosystems von Manufacturing-X erweist. Für die teilnehmenden Unternehmen ist es erforderlich, vorab ein geeignetes Geschäftsmodell zum Einsatz eines digitalen Zwillings zu definieren. Hierzu werden ausgewählte Beispiele wie beispielsweise Predictive Maintenance und Manufacturing-as-a-Service gegeben.

Zur Bewältigung dieser komplexen Aufgabe ist ein Phasenmodell erarbeitet worden, das Einführung und Rahmenbedingungen, Geschäftsnutzen, technische sowie organisatorische Integration systematisch würdigt. Dabei werden relevante Aspekte sowohl für die Unternehmen als Nutzer als auch für die Manufacturing-X Betreiber thematisiert. Die technische Implementierung erfährt eine detaillierte Behandlung. Hierfür erfolgt eine Würdigung der OPC UA Standards als adäquate Lösungsmöglichkeit und die Vorstellung einer generische Manufacturing-X Architektur. Für die organisatorische Integration werden Vorschläge gemacht, die einerseits auf Erfahrungen aus dem Gaming-Bereich und von Dating Apps basieren und etablierte Konzepte auf Marktplätzen aufgreifen.

## LITERATUR

Amazon Web Services, Inc. (o. D.a) *Data Lakes auf AWS* [Online]. Verfügbar unter <https://aws.amazon.com/de/big-data/datalakes-and-analytics/datalakes/> (Abgerufen am 5 Juli 2023).

Amazon Web Services, Inc. (o. D.b) *Was ist ETL? – Extract Transform Load erklärt – AWS* [Online]. Verfügbar unter <https://aws.amazon.com/de/what-is/etl/> (Abgerufen am 5 Juli 2023).

ascolab (o. D.) *OPC UA Security* [Online]. Verfügbar unter <https://www.ascolab.com/en/technology-unified->

- architecture/technology-security.html (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- AWS Workshop Studio (o. D.) *Set up OPC UA Server* [Online]. Verfügbar unter <https://catalog.us-east-1.prod.workshops.aws/workshops/73235981-96cd-4da4-afdf-c2a2c2e9fe88/en-US/onboarding/setup-opc-ua-server> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Bergs, T, Brecher, C, Schmitt, R & Schuh, G (Hg.) (2020) *Internet of Production - Turning Data into Value: Statusberichte aus der Produktionstechnik 2020*, Aachen, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT.
- Bitkom e.V. (2023) *Manufacturing-X: Mögliche Anwendungen, Anforderungen und Akteure aus Sicht der Digitalwirtschaft* [Online]. Verfügbar unter <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2023-04/230417BitkomManufacturing-XDigitalwirtschaft.pdf>.
- BMW Group (2023) *Catena X: Innovation durch Kooperation* [Online]. Verfügbar unter <https://www.bmwgroup.com/de/news/allgemein/2023/catenax.html> (Abgerufen am 30 April 2023).
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (2020) *Collaborative Condition Monitoring* [Online]. Verfügbar unter [https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Kurzmeldungen/2020/2020-02-18\\_Collaborative-Condition-Monitoring.html](https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Kurzmeldungen/2020/2020-02-18_Collaborative-Condition-Monitoring.html) (Abgerufen am 6 Juli 2023).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (o. D.) *Collaborative Condition Monitoring* [Online]. Verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Artikel/Digital-World/GAIA-X-Use-Cases/collaborative-condition-monitoring.html> (Abgerufen am 6 Juli 2023).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023a) *Weg zur aktiven Teilnahme - Informationen für Datenanbieter und -nutzer* [Online]. Verfügbar unter <https://catena-x.net/de/catena-x-einfuehren-umsetzen/einfuehrung-von-catena-x> (Abgerufen am 6 Juli 2023).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023b) *Manufacturing-X: Initiative zur Digitalisierung der Lieferketten in der Industrie* [Online]. Verfügbar unter <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Manufacturing-X/Initiative/initiative-manufacturing-x.html> (Abgerufen am 7 Juli 2023).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023c) *Manufacturing-X – FAQ* [Online]. Verfügbar unter [https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Standardartikel/ManufacturingX\\_FAQ.html](https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Standardartikel/ManufacturingX_FAQ.html) (Abgerufen am 7 Juli 2023).
- Catena-X (o. D.) *Die Vision von Catena-X* [Online]. Verfügbar unter <https://catena-x.net/de/vision-ziele> (Abgerufen am 30 April 2023).
- Catena-X (2022) *Semantic Layer/Digital Twins* [Online]. Verfügbar unter <https://catena-x.net/de/angebotestandards/digitaler-zwilling> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Catena-X Automotive Network Konsortialprojekts (2022) *Eclipse Dataspace Connector (EDC): zentrale Komponente von Catena-X | Catena-X* [Online]. Verfügbar unter <https://catena-x.net/de/angebotestandards/edc-die-zentrale-komponente-fuer-die-navigation> (Abgerufen am 5 Juli 2023).
- Catena-X Automotive Network Konsortialprojekts (2023) *Weg zur aktiven Teilnahme* [Online]. Verfügbar unter <https://catena-x.net/de/catena-x-einfuehren-umsetzen/einfuehrung-von-catena-x> (Abgerufen am 6 Juli 2023).
- DHL Trend Research (2019) „Digital Twins in Logistics: A DHL perspective on the impact of digital twins on the logistics industry“ [Online]. Verfügbar unter <https://www.dhl.com/content/dam/dhl/global/core/documents/pdf/glo-core-digital-twins-in-logistics.pdf> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Eclipse Foundation (Hg.) (o. D.) *Eclipse Dataspace Components* [Online]. Verfügbar unter <https://projects.eclipse.org/projects/technology.edc> (Abgerufen am 30 Juni 2023).

- Esri (2021) *Technologie für digitale Zwillinge und GIS | Was ist ein digitaler Zwilling?* [Online]. Verfügbar unter <https://www.esri.com/de-de/digital-twin/overview> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- European Commission (2023) *Eclipse Dataspace Components* [Online]. Verfügbar unter <https://eclipse-edc.github.io/docs/#/README> (Abgerufen am 3 Juli 2023).
- exone.de (2023) *Digital Twins: Die Zukunft für Unternehmen?* [Online]. Verfügbar unter <https://www.exone.de/ratgeber/digital-twins/> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Fischer, C. (2020) „Warum dem Digital Twin die Zukunft gehört“, *Deutsche Telekom MMS GmbH*, 15. April [Online]. Verfügbar unter <https://blog.telekom-mms.com/digital-stories/warum-dem-digital-twin-die-zukunft-gehört> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Schnicke, F. und Kuhn, T. (2020) „Digitaler Zwilling: Aufbau der Industrie 4.0-IT-Infrastruktur“, *Fraunhofer IESE*, 15. Oktober [Online]. Verfügbar unter <https://www.iese.fraunhofer.de/blog/digitale-zwillinge-it-infrastruktur/> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik ISST *Eclipse Dataspace Components (EDC) im Gesundheitswesen* [Online]. Verfügbar unter <https://www.isst.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/gesundheitswesen/technologien/Eclipse-Dataspace-Components.html> (Abgerufen am 5 Juli 2023).
- Grösser, S. Prof. Dr. (2018) „Definition: Digitaler Zwilling“, *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*, 19. Februar [Online]. Verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitaler-zwilling-54371> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Human, S. (2020) „Das Beste zweier Welten: der Digital Twin“, *Industry of Things*, 3. Februar [Online]. Verfügbar unter <https://www.industry-of-things.de/das-beste-zweier-welten-der-digital-twin-a-900237/> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- IBM (2023) *Was ist ein digitaler Zwilling?* | IBM [Online]. Verfügbar unter <https://www.ibm.com/de-de/topics/what-is-a-digital-twin> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- IPC2U (o. D.) *Die Standards OPC DA und OPC UA ganz einfach erklärt* [Online]. Verfügbar unter <https://ipc2u.de/artikel/wissenswertes/die-standards-opc-da-und-opc-ua-ganz-einfach-erkl-rt/> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Kanal, M. (2022) *Der Eclipse Dataspace Connector (EDC) – Architektur und Nutzen des Frameworks* [Online]. Verfügbar unter <https://blog.doubleslash.de/der-eclipse-dataspace-connector-edc-architektur-und-nutzen-des-frameworks> (Abgerufen am 5 Juli 2023).
- Kolodziej, M. & Vazquez, P. (2023) *Enabling data sharing through data spaces and AWS* [Online]. Verfügbar unter <https://aws.amazon.com/de/blogs/publicsector/enabling-data-sharing-through-data-spaces-aws/> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Microsoft (o. D.a) *Azure Data Factory – Datenintegrationsdienst | Microsoft Azure* [Online]. Verfügbar unter <https://azure.microsoft.com/de-de/products/data-factory> (Abgerufen am 5 Juli 2023).
- Microsoft (o. D.b) *Azure Data Lake Storage Gen2 – Preise | Microsoft Azure* [Online]. Verfügbar unter <https://azure.microsoft.com/de-de/pricing/details/storage/data-lake/> (Abgerufen am 5 Juli 2023).
- Neugebauer, J., Heilig, L. & Voß, S. (2023) „Anforderungsanalyse zur Umsetzung eines digitalen Zwillings im Containerterminal“, *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, Vol. 60, No. 1, S. 110–131 [Online]. DOI: 10.1365/s40702-022-00941-1.
- OPC Foundation (o. D.a) *Design goals* [Online]. Verfügbar unter <https://reference.opcfoundation.org/Core/Part1/v105/docs/5.3> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- OPC Foundation (o. D.b) *OPC UA Binary* [Online]. Verfügbar unter <https://reference.opcfoundation.org/Core/Part6/v105/docs/5.2> (Abgerufen am 30 Juni 2023).

- OPC Foundation (o. D.c) *OPC UA JSON* [Online]. Verfügbar unter <https://reference.opcfoundation.org/Core/Part6/v105/docs/5.4> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- OPC Foundation (o. D.d) *OPC UA XML* [Online]. Verfügbar unter <https://reference.opcfoundation.org/Core/Part6/v105/docs/5.3> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- OPC Router (o. D.) *Was ist OPC UA? Die wichtigsten Begriffe im Überblick* [Online]. Verfügbar unter <https://www.opc-router.de/was-ist-opc-ua/> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- (2018) *OPC Unified Architecture: Interoperabilität für Industrie 4.0 und das Internet der Dinge* [Online], 8. Aufl., OPC Foundation. Verfügbar unter <https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2017/11/OPC-UA-Interoperability-For-Industrie4-and-IoT-DE.pdf> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Otto, B., Hompel, M. ten & Wrobel, S. (2022) *Designing Data Spaces: The Ecosystem Approach to Competitive Advantage*, Cham, Springer International Publishing; Imprint Springer.
- Pauer, A., Nagel, L., Fedkenhauser, T., Fritzsche-Sterr, Y. & Resetko, A. (2018) „Data exchange as a first step towards data economy“ [Online]. Verfügbar unter <https://www.pwc.de/en/digitale-transformation/data-exchange-as-a-first-step-towards-data-economy.pdf> (Abgerufen am 6 Juli 2023).
- Phoenix Contact (o. D.) *OPC UA* [Online]. Verfügbar unter <https://www.phoenixcontact.com/de-de/technologien/kommunikationstechnologien/opc-ua> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Plattform Industrie 4.0 (2022) „Whitepaper „Manufacturing-X“: Eckpunkte für die Umsetzung von „Manufacturing-X“ im produzierenden Gewerbe zur Sicherung des Wettbewerbsstandortes Deutschland“ [Online]. Verfügbar unter [https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Manufacturing-X\\_lang.pdf?\\_\\_blob=publication-File&v=1](https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Manufacturing-X_lang.pdf?__blob=publication-File&v=1) (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Plattform Industrie 4.0 (2023) *Manufacturing-X: Initiative zur Digitalisierung der Lieferketten in der Industrie* [Online]. Verfügbar unter <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Manufacturing-X/Initiative/initiative-manufacturing-x.html> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- PwC (2018) „Der digitale Zwilling: Erwartungen und Einschätzungen der deutschen Bevölkerung mit besonderem Fokus auf Diabeteserkrankungen“ [Online]. Verfügbar unter <https://www.pwc.de/de/gesundheitswesen-und-pharma/pwc-studie-der-digitale-zwilling.pdf> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Siemens (o. D.) *OPC UA – strukturierte Daten bis in die Cloud* [Online]. Verfügbar unter <https://www.siemens.com/de/de/produkte/automatisierung/industrielle-kommunikation/opc-ua.html> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Siemens (2019) *Digital Twin | Siemens* [Online]. Verfügbar unter <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/digital-twin/24465> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Sodabathina, R., Shan, J. & Ulloa, M. (2022) *Building event-driven architectures with IoT sensor data* [Online], AWS Architecture Blog. Verfügbar unter <https://aws.amazon.com/de/blogs/architecture/building-event-driven-architectures-with-iot-sensor-data/> (Abgerufen am 30 Juni 2023).
- Uhlenkamp, J.-F., Hribernik, K. & Thoben, K.-D. (2020) „Wie Digitale Zwillinge Unternehmensgrenzen überwinden“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Vol. 115, s1, S. 84–89.
- van der Aalst, W. M. P., Hinz, O. & Weinhardt, C. (2021) „Resilient Digital Twins“, *Business & Information Systems Engineering*, Vol. 63, No. 6, S. 615–619 [Online]. DOI: 10.1007/s12599-021-00721-z.
- VDMA (2022) „Manufacturing-X: Denkansätze zum Aufbau und zur Etablierung eines deutschen und europäischen Datenökosystems für das produzierende Gewerbe mit der Ausrüsterindustrie als Nukleus und Multiplikator“ [Online]. Verfügbar unter <https://>

vdma.org/documents/34570/55087429/VDMA-Whitepaper%20Manufacturing-X.pdf/7e799522-d86d-5004-32de-4388ee891a8c (Abgerufen am 30 Juni 2023).

vom Dorp, J., Merschjohanna, S., Meier, D., Patzer, F., Karch, M. & Haas, C. (2022) *Sicherheitsanalyse OPC UA* [Online], Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. Verfügbar unter [https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Studien/OPCUA/OPCUA\\_2022.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Studien/OPCUA/OPCUA_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=10).

Weiss, A. (2022) „Gaia-X – Grundlagen für den Aufbau föderierter, digitaler Ökosysteme nach europäischen Regeln“, *Datenschutz und Datensicherheit - DuD*, Vol. 46, No. 4, S. 227–232 [Online]. DOI: 10.1007/s11623-022-1593-8.

Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (2016) „Beispiele-Verwaltungsschale-Industrie-40-Komponente-Basisteil: Fortentwicklung des Referenzmodells für die Industrie 4.0-Komponente“ [Online]. Verfügbar unter [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](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) (Abgerufen am 5 Juli 2023).