

Bereitschaftsanalyse der Verwaltungsschale für den Einsatz entlang von Wertschöpfungsketten

Software-defined Value Networks

D. Dietrich, M. Musser, A. Lechler, A. Verl

ZUSAMMENFASSUNG Für die unternehmensübergreifende Orchestrierung software-definierter Wertschöpfungsnetzwerke ist eine standardisierte Modellierung erforderlich. Dies bietet die Verwaltungsschale mit ihrem Metamodell und ihren standardisierten Teilmodellen. Dieser Beitrag analysiert die Bereitschaft der Verwaltungsschale für den Einsatz in Wertschöpfungsketten mit Fokus auf Produkte und Services. Die Analyse erfolgt anhand von Reifegradmodellen digitaler Zwillinge sowie entworfenen Anwendungsfällen des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0.

STICHWÖRTER

Verwaltungsschale (AAS), Wertschöpfungsketten, Industrie 4.0

Software-defined value networks – Analyzing the capacity for using the asset administration shell along value chains

ABSTRACT The cross-company orchestration of software-defined value networks requires standardized modelling. This is provided by the asset administration shell with its metamodel and standardized submodels. This article analyzes the capacity of the asset administration shell to perform along value chains, focusing on products and services. The analysis is based on identified maturity models of digital twins and designed use cases of the reference architecture model Industrie 4.0.

1 Einführung

Im Zuge der Globalisierung in der Industrie entstanden in den vergangenen Jahrzehnten mit der Externalisierung von Produktionsaktivitäten verteilte Lieferketten über die ganze Welt. Die Fragilität solcher verteilten und hochkomplexen Strukturen mit ihren Auswirkungen auf die produzierende Industrie wurde in den vergangenen Jahren durch Krisen, Kriege und Unsicherheiten (zum Beispiel Chipmangel, Ukraine-Krieg, schwankende Transportkosten) deutlich. Dies liegt auch an eingeschränkten Schnittstellen entlang der Wertschöpfungskette, welche durch proprietäre Tools des Supply-Chain-Managements gegeben sind. Diese erlauben zwar eine Verwaltung der Wertschöpfungsketten, beschränken sich jedoch meist auf das eigene Software-Ökosystem, was zu Kompatibilitätsproblemen führt oder mit Integrationsaufwand für Middleware-Lösungen bei der Anbindung von Partnern einhergeht. Neben vorhandenen Automatisierungslösungen, wie automatischen Bestellprozessen, erfordern gerade unternehmensübergreifende Schnittstellen mit vertrauensvollem Datenaustausch derzeit manuelle Tätigkeiten. Dazu zählt vor allem die Reaktion auf die zuvor genannten Unsicherheiten, etwa durch Diversifizierung von Supply-Chains. Die Ermöglichung eines solchen automatisierten, interoperablen und vertrauensvollen Datenaustauschs rückte in den letzten Jahren in den Fokus von öffentlich geförderten Projekten in der Produktion, vor allem mit „Catena-X“ in der Automobil- und Zuliefererindustrie [1].

Um die Resilienz dieser globalen Wertschöpfungsketten zu steigern, können software-definierte Ansätze eine größere Flexibilität in der Produktion durch etablierte Lösungen der Informa-

tionstechnik bieten. Diese Ansätze gibt es sowohl innerhalb eines Produktionssystems in Form von „Software-defined Manufacturing“ als auch in Wertschöpfungsnetzwerken als „Software-defined Value Networks“ (SDVN) [2, 3]. SDVN sollen durch eine unternehmensübergreifende interoperable Vernetzung von Planungssystemen, denkbar adäquat zu einem Manufacturing Execution System, eine übergeordnete Optimierung von Wertschöpfungsketten erzielen.

Für die Orchestrierung von Wertschöpfungsketten mithilfe SDVN sind standardisierte Datenmodelle digitaler Zwillinge für einen interoperablen Austausch beispielsweise von Produktdaten erforderlich [4]. Sie bilden im Verbund mit dem Asset, also dem physischen Gegenstand, den sie beschreiben, eine Industrie-4.0-Komponente. Ein derzeit vielfach in Architekturen genannter und sich in Entwicklung befindlicher Standard eines solchen digitalen Zwilling ist die Verwaltungsschale (VWS) [5, 6].

Konzepte ihrer Informationsmodellierung verfolgen häufig den Produkt-Prozess-Ressource (PPR)-Ansatz [7]. Für die Betrachtung von Wertschöpfungsnetzwerken zeigen sich hier vor allem Produkte und Services von Relevanz. Ein Service wird in [7] als Fähigkeit eines Produktionssystems unter Einbezug wirtschaftlicher Rahmenbedingungen beschrieben, der mit erforderlichen Services eines Produkts abgeglichen werden kann. Im Kontext wertschöpfer Anteile in einem Wertschöpfungsnetzwerk ergeben sich neben Produktionsdienstleistungen zusätzlich zu berücksichtigende Aspekte der Logistikdienstleistungen, von Produkten als Subkomponenten und, wie in [8] vorgestellt, Engineering-Dienstleistungen zur Planung der Produktion.

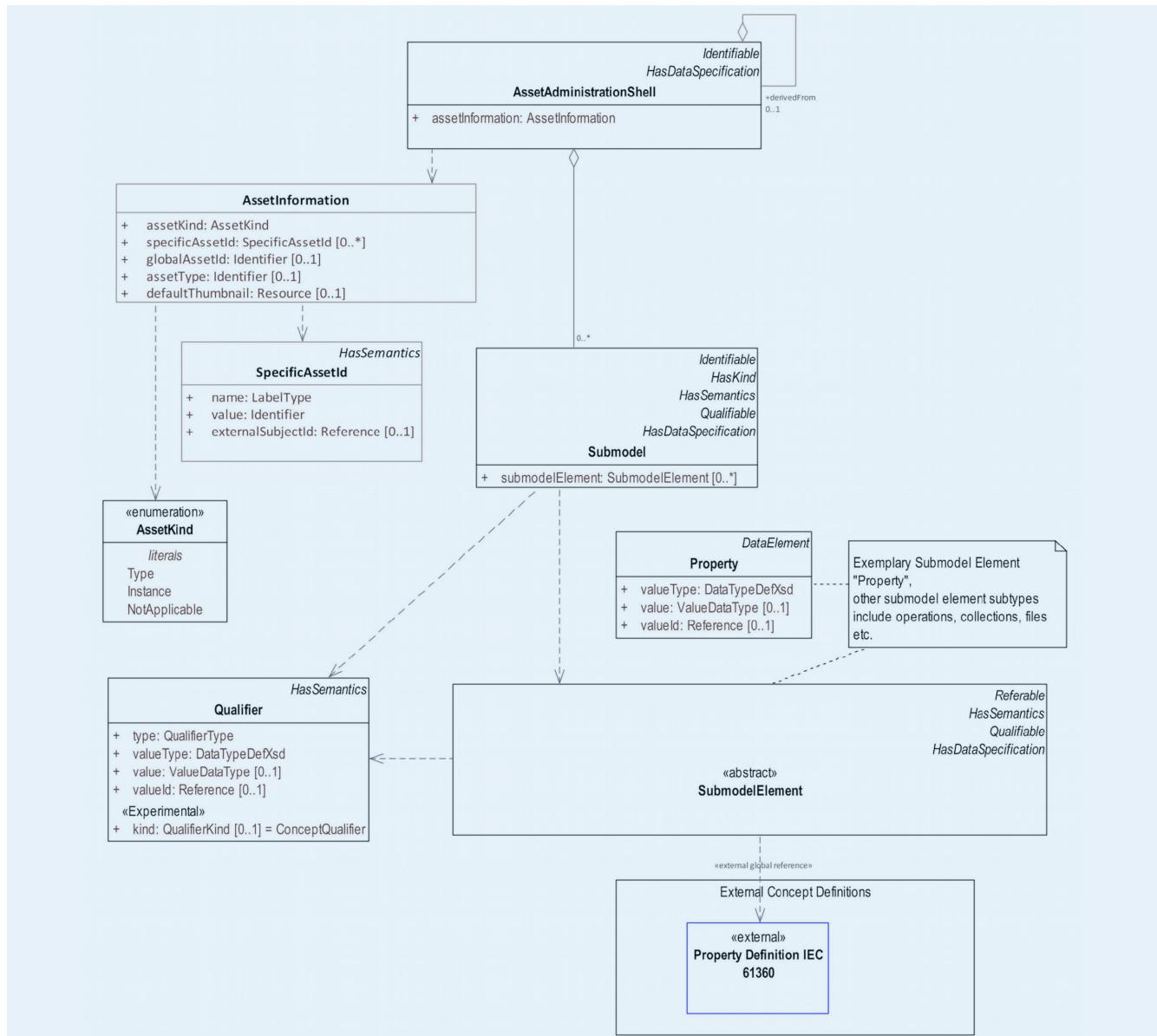


Bild 1. Übersicht des Metamodells der Verwaltungsschale (VWS). *Grafik:* [12]

Modelle dieser und weiterer Assets werden in der Standardisierung der VWS nach Use Cases in Submodelle gegliedert. Trotz hoch eingeschätzter Relevanz der VWS werden standardisierte Datenformate als fehlender Kernfaktor zur Umsetzung von SDVN in der Umfrage in [4] genannt. Dies erfordert eine Analyse der Einsatzbereitschaft der VWS und ihrer standardisierten Submodelle für die Orchestrierung in Wertschöpfungsnetzwerken.

Die Forschungsfrage dieses Beitrags lautet demnach wie folgt: Welche Reife besitzt die Standardisierung der Verwaltungsschale als digitaler Zwilling für die Anwendung in der Orchestrierung von Wertschöpfungsnetzwerken? Hierzu werden zunächst die Grundlagen der VWS und verwandte Arbeiten bestehender Reviews der VWS eingeführt. Anschließend wird der Stand der Technik zu Reifegradmodellen digitaler Zwillinge vorgestellt und Anforderungen und Anwendungsfälle der Orchestrierung von Wertschöpfungsnetzwerken in Bezug auf das „Referenzarchitekturmödell Industrie 4.0“ (RAMI 4.0) entworfen. In der folgenden Analyse wird einerseits die VWS mithilfe bestehender Reifegrad-

modelle digitaler Zwillinge betrachtet. Andererseits wird die Standardisierung der VWS anhand der aufgestellten Anforderungen für die exemplarischen Anwendungsfälle analysiert. Die somit bestehenden Ergebnisse aus Business-, Technologie- und Domänenicht werden abschließend zusammengefasst.

2 Grundlagen der Verwaltungsschale

Die VWS bietet einen Standard für den digitalen Zwilling in der Industrie und wird von der Industrial Digital Twin Association (IDTA) frei verfügbar standardisiert. Der Standard umfasst Spezifikationen der VWS selbst in [9] sowie Teil- beziehungsweise Submodelle für spezifische Use Cases in [10], welche im Folgenden über die IDTA-Nummer referenziert werden. Einen wesentlichen Teil der VWS-Spezifikation nimmt die Standardisierung eines Metamodells (IDTA 01001-3-0-1) ein. Das Metamodell gibt die Struktur der VWS mit möglichen Elementen und Metainformationen vor und ist in **Bild 1** zu sehen.

Eine VWS beschreibt jeweils ein über die AssetInformation eindeutig zugeordnetes Asset, also ein Objekt von Wert für eine Organisation, und stellt eine strukturierte Sammlung von dessen Daten über den Lebenszyklus mit einheitlichen Zugriffspunkten für Informationen und Aktionen dar. Dabei wird unterschieden zwischen passiven VWS in Form statischer Dateien, reaktiven VWS auf einem Server mit Zugang über Application Programming Interfaces (API), siehe IDTA 01002-3-0-3, und proaktiven VWS, die miteinander über die Industrie-4.0-Sprache (siehe [11]) kommunizieren. Eine weitere Unterscheidung zwischen Typ- und Instanz-VWS bezieht sich auf ebendiese Unterscheidung des Assets. Eine Verwaltungsschale kann sowohl in einem eigenen AASX-Dateiformat (IDTA 01005-3-0-1) als auch serialisiert in JavaScript Object Notation (JSON) oder der Extensible Markup Language (XML) gespeichert oder ausgegeben werden. Der Aufbau der VWS geschieht mithilfe der ebenfalls in Bild 1 abgebildeten Submodelle, die jeweils einen Use Case oder eine Ansicht auf das Asset darstellen [12].

Die Submodelle enthalten Submodell-Elemente, wie Eigenschaften (Property), Bereiche (Range) oder Dateien (Files) als Datenelemente, können aber auch Operationen (Operation) oder Events darstellen und in Kollektionen (Collection) hierarchisch gegliedert werden. Neben der Identifizierung (Identifier, kurz ID) kann zur zusätzlichen Beschreibung der Submodell-Elemente beispielsweise eine Semantik (Semantics) und eine Qualifizierung (Qualifier) genutzt werden. Erstere gibt neben beschreibenden IDs eine maschinenlesbare und vergleichbare semantische Identifikation an, welche system- und sprachübergreifend eindeutig ist. Letztere Qualifier geben etwa Kardinalitäten oder mögliche Werte eines Elements an. Zur Implementierung der VWS bestehen verschiedene kommerzielle und nicht-kommerzielle Lösungen.

Die logische Struktur der Submodelle wird durch Templates vorgegeben, welche ebenfalls von der IDTA für verschiedene Anwendungen (Use Cases) spezifiziert werden, aber auch darüber hinaus eigens erstellt werden können. Die jeweiligen Spezifikationen existieren sowohl im PDF- wie im AASX- und JSON-Format. Sie geben notwendige Submodell-Elemente mit ihrer ID, Struktur, Semantik und Qualifizierung als Standard vor. Auf der Seite der IDTA vom 14.03.2025 sind 93 Templates gelistet [10]. Hier von sind 35 „Published“, eines „In Review“, 40 „In Development“ und 17 im Status „Proposal submitted“. Vier der Templates sind mehrfach in unterschiedlichen Versionen gelistet. Nur die Spezifikationen im Status „Published“ sind vollständig einsehbar, der Inhalt der weiteren Spezifikationen wird über eine Kurzfassung beschrieben.

In verwandten Arbeiten präsentierte zunächst [13] ein Review der VWS mit dem Forschungsfortschritt zur Interoperabilität, Modellierung und Anwendung. Schlussfolgerungen in der Interoperabilität betreffen die fehlende Forschung im Zusammenspiel einer Vielzahl von VWS im Kontext einer zunehmenden Anzahl domänenpezifischer Ontologien. Für die Modellierung werden ebenfalls verschiedene Skalen der VWS von einzelnen Assets bis hin zu ganzen Fabriken festgestellt, deren Granularität in der Modellierung nicht gegeben ist. Die Anwendung wird vorwiegend im Themenfeld intelligenter Fertigung festgestellt, mit Potenzial zur Übertragbarkeit auf weitere Felder wie Bestellung oder Logistik. [13]

[14] betrachtet in einer systematischen Literaturrecherche implementierte Eigenschaften des VWS-Metamodells sowie Werkzeuge zu ihrer Realisierung. Während eine Eignung des flexiblen

Metamodells für vielfältige Industrie-4.0-Assets gesehen wird, beschränkt sich die Anwendung vorwiegend auf die Informationsmodellierung von Ressourcen. Für ihren Erstellungsprozess werden Kenntnisse in der Informationstechnik als Voraussetzung angesehen, wobei nur wenige Werkzeuge vorgefunden werden, welche sich auf Fachleute fokussieren. [14]

[15] betrachtet in seiner Untersuchung Open-Source-Implementierungen der reaktiven VWS. Ausgehend von 58 identifizierten Implementierungen der VWS werden vier aktive, funktionsfähige Implementierungen der reaktiven VWS identifiziert und anhand von Bewertungskriterien verglichen. Dabei wurden keine Open-Source-Implementierungen identifiziert, welche die derzeitige Spezifikation der VWS vollständig erfüllen. Während minimale Anforderungen des Hypertext Transfer Protocols (HTTP) zum Schreiben und Lesen der VWS erfüllt werden, wird die Synchronisation mit physischen Assets als offener Punkt identifiziert, wobei auch verschiedene Implementierungen inkompatibel zueinander sind. [15]

In [16] wird ein Review zur vorausschauenden Instandhaltung unter Anbetracht der VWS vorgestellt und wie diese in datengebundene Ansätze der Automobilindustrie beziehungsweise das Produktdaten-Management (PdM) integriert ist. Schlussfolgernd wurde eine Forschungslücke identifiziert, wie die VWS und das PdM strategisch integriert werden können. [16]

Obwohl bestehende Reviews verschiedene Aspekte der VWS systematisch betrachten, die zur Analyse ihrer Reife beitragen, ist eine Analyse, insbesondere mit Fokus auf ihren Einsatz entlang Wertschöpfungsketten, in der Literatur nicht vorzufinden. Im Folgenden werden somit Reifegradmodelle digitaler Zwillinge zur systematischen Analyse der VWS vorgestellt.

3 Reifegradmodelle digitaler Zwillinge

In der Literatur bestehen verschiedene Modelle zur Bewertung oder Kategorisierung von digitalen Zwillingen und ihrem Reifegrad. Diese werden im Folgenden vorgestellt. Abschließend wird ihre Eignung zur Analyse der VWS betrachtet.

In [17] wird ein Reifegradmodell digitaler Zwilling basierend auf den Gemini-Prinzipien Zweck, Vertrauen und Funktion entworfen. Diese umfassen mehrere Kriterien wie die Erleichterung der Wertschöpfung und der Leistungsverbesserung. Anhand einer Literaturrecherche und einer Expertenumfrage werden Rubriken der Dimensionen für das Asset Management entworfen. Mithilfe einer Score-Berechnung wird abschließend die Reife des digitalen Zwilling bewertet. Das Reifegradmodell wird anhand einer Fallstudie mit dem Vergleich zweier digitaler Zwillinge evaluiert. Definierte Kriterien, wie die Punktzahl, die für die jeweiligen Rubriken zu vergeben ist, können jedoch nicht vorgefunden werden. [17]

Eine Klassifikation digitaler Zwillinge im Kontext der Produktion ist in [18] zu finden. Die drei vorgestellten Reifegrade werden hinsichtlich der Integration des digitalen Objekts zu dem betreffenden Asset beschrieben. Ausgehend von digitalen Modellen ohne automatisierte Kommunikation, steigt sich der Reifegrad über digitale Schatten, mit Kommunikation vom Asset zum digitalen Objekt, hin zu digitalen Zwillingen mit automatisierter bidirektonaler Kommunikation. Anhand dieser Ebenen der Integration sowie des Typs, des Anwendungsbereichs und der verwendeten Technologie erfolgt ein Review der Literatur. Dabei werden

vorwiegend Konzepte oder Stufen niedrigerer Integration identifiziert. [18]

Ein weiteres Reifegradmodell digitaler Zwillinge wird in [19] im Verbund mit einem Review bestehender Fähigkeiten, Technologien und Anwendungen dieser dargestellt. Basierend auf bestehenden Definitionen und Fähigkeiten digitaler Zwillinge werden fünf Ebenen der Reife vorgeschlagen. Sie bauen auf der Definition in [18] als Ebene 1 bis 3 auf und ergänzen diese um kognitive digitale Zwillinge (Ebene 4) und föderierte digitale Zwillinge (Ebene 5). Anforderungen bestehen aufbauend für Ebene 4 in der Verwendung künstlicher Intelligenz, Wissen und Strategien zur Optimierung und Entscheidungsunterstützung sowie in Ebene 5 der Vernetzung mehrerer digitaler Zwillinge [19]. Ähnliche Ansätze der Erweiterung der drei Ebenen sind mit künstlicher Intelligenz in [20] oder einer Vorstufe des digitalen Zwilling als Ebene 0 vor der Erzeugung der physischen Komponente in [21] zu finden.

Das „Software Process Improvement and Capability dEtermination“ (SPICE) bietet einen ISO-Standard zur Verbesserung von Prozessen in der Softwareentwicklung, der mittlerweile auf verschiedenste Domänen übertragen wurde. Dies betrifft auch die Domäne der Modellierung und Simulation, welche zum Ziel hat, relevante Standards und Vorschriften einzuhalten, Vertrauen in Ergebnisse zu erhöhen und die industrielle Nutzung zu fördern. [22]

Der letzte vorgestellte Ansatz zur Bewertung digitaler Zwillinge ist die „Digital Twin Capabilities Periodic Table“ (CPT). Diese umfasst verschiedenste Kriterien in den Kategorien Datendienste, Integration, Intelligenz, Nutzererlebnis, Management und Vertrauenswürdigkeit, auf deren Erfüllung ein digitaler Zwilling geprüft werden kann. [23]

Offenkundig betrachten vorzufindende Reifegradmodelle vorwiegend eine Klassifizierung der Funktion. [17] teilt dies weiter mit den Gemini-Prinzipien in Rubriken auf, nennt jedoch keine Kriterien für die zu vergebende Punktzahl. Die Definitionen in [18–21] hingegen teilen den Reifegrad in Ebenen ein, welche vor allem in [18] durch die Kriterien des Datenflusses zwischen Asset und digitalem Zwilling definiert sind. Während SPICE in der Domäne der Modellierung zwar Anhaltspunkte für die Bewertung liefert, liegt der Fokus auf der internen Bewertung und Verbesserung der Prozesse. Die CPT betrachtet verschiedenste Kriterien für die Bewertung digitaler Zwillinge, enthält jedoch keine quantitative Reifegradbewertung. Die Möglichkeit zur direkten Analyse der VWS bieten somit die Reifegradstufen und die Kriterien der CPT. Eine vollständige Analyse des Standards der VWS ist durch die vorgestellten Arbeiten im Kontext des Einsatzes in Wertschöpfungsketten möglich, jedoch nicht vollständig, und wird in Kapitel 5 um die Analyse weiterer Anwendungsfälle ergänzt.

4 Anwendungsfälle und Anforderungen der Orchestrierung

Das RAMI 4.0 bietet eine Struktur zur Beschreibung wesentlicher Industrie-4.0-Aspekte [24]. Es umfasst die drei Dimensionen:

- Hierarchie: von Produkten bis zur Connected World als Zugang in das Internet der Dinge
- Lebenszyklus und Wertstrom: von der Entwicklung eines Produkt-Typs bis zur Nutzung und Wartung ihrer Instanz, und

– Ebene: von dem einzelnen Asset über dessen Kommunikation und Information bis zur Business Perspektive.

In Relation zu anderen Standards, zum Beispiel Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA), wird die VWS hier vor allem für Informationen von Assets beziehungsweise Produkten über ihren Lebenszyklus und die Kommunikation dieser in der Connected World hervorgehoben [25]. Definierte Anwendungsfälle oder Anforderungen des RAMI 4.0 an digitale Zwillinge oder deren Modellierung als VWS konnten nicht identifiziert werden. Zur Anwendung dieses Referenzmodells auf die Orchestrierung von Produkten in Wertschöpfungsnetzwerken werden somit im Folgenden vier Anwendungsfälle entlang der Dimension des Lebenszyklus entworfen. Diese wird unterteilt in Typ-Entwicklung, Typ-Nutzung/Wartung, Instanz-Produktion und Instanz-Nutzung/Wartung.

Der erste Anwendungsfall (A1) betrachtet die Auflösung von Zielkonflikten in der Entwicklung von Produkt-Typen. Hierbei soll in der Entwicklung oder bei der Initialisierung einer Instanz aus dem Produkt-Typ ein Konflikt konkurrierender Zielgrößen aufgelöst werden. Zielgrößen können beispielsweise aus den vier Bereichen monetärer, zeitlicher, qualitativer und nachhaltiger Kosten stammen und Materialpreise, Durchlaufzeiten oder den CO₂-Fußabdruck berücksichtigen. Eine Auflösung oder Optimierung kann durch die Auswahl entsprechender (Sub-)Komponenten, Produktions- und Logistikprozesse oder deren Engineering geschehen. Der Typ des Produkts kann dabei nicht alleine, sondern muss im Kontext von Angeboten des Wertschöpfungsnetzwerks, also der Connected World, betrachtet werden. Anforderungen bestehen sowohl in einer einheitlichen funktionalen Beschreibung von Produkten (A1.1) zur Wiederverwendung als Komponente wie auch als angebotene Services (A1.2) in Form von Produktions-, Logistik- und Engineering-Dienstleistungen. Für die Auflösung des Zielkonflikts werden außerdem deren jeweilige Varianten (A1.3) verbunden mit ihren Kosten der multikriteriellen Zielgrößen (A1.4) benötigt.

Der zweite entworfene Anwendungsfall (A2) in der Nutzung und Wartung von Produkt-Typen betrachtet deren Anpassung. Dies betrifft einerseits mögliche Änderungen des Produkts beim Original Equipment Manufacturer (OEM), etwa ausgelöst durch gesetzliche Vorgaben, die für Produkte und Services entlang der Zulieferkette propagiert werden sollen. Andererseits wird das Angebot neuer Technologien betrachtet, die aus der Zulieferkette oder dem Markt stammen und für eine Optimierung des Produkts oder die Diversifikation der Wertschöpfungskette einbezogen werden. Dies benötigt eine Kenntnis des Produkts mit verwendeten Komponenten und Services (A2.1) und eine Beschreibung der Produktänderung (A2.2) aufseiten des OEM. Seitens der Zulieferer muss bekannt sein, in welchen Wertschöpfungsketten eigene Technologien verwendet werden (A2.3).

Im dritten Anwendungsfall (A3) wird die Produktion einer Instanz unter veränderlichen Rahmenbedingungen betrachtet. Für bestehende Wertschöpfungsketten innerhalb eines Netzwerks sollen Änderungen des geplanten Zustands erfasst und entlang dieser Wertschöpfungskette propagiert werden. Dies können beispielsweise Preisschwankungen durch Knaptheiten oder Zölle und Disruptionen durch Kriege oder Pandemien sein. In Folge lässt sich der Einfluss auf die multikriteriellen Zielgrößen beziehungsweise funktionalen und nicht-funktionalen Randbedingungen bestimmen und entsprechend A1 gegebenenfalls eine erneute Auflösung vornehmen. Anforderungen hieraus bestehen neben

Tabelle 1. Reifegradebenen digitaler Zwillinge mit Klassifizierung der VWS.

Reifegrad	passive VWS	reaktive VWS	proaktive VWS
Ebene 5: Föderierter digitaler Zwilling			x
Ebene 4: Kognitiver digitaler Zwilling			x
Ebene 3: Digitaler Zwilling		x	x
Ebene 2: Digitaler Schatten		x	x
Ebene 1: Digitales Modell	x	x	x
Ebene 0: Vorstufe ohne physische Komponente	x	x	x

der Verwendung von Produkten und Services gemäß A2.3 in der Kenntnis von externen Größen und Rahmenbedingungen der Produktion (A3.1). Zudem ist die Kenntnis der Abhängigkeit der Produkte von genannten Einflussfaktoren nötig, um bei deren Änderung eine Reaktion zu ermöglichen (A3.2).

Der letzte Anwendungsfall (A4) wird für die Nutzung und Wartung einer Instanz entworfen und betrachtet die Transparenz der Wertschöpfungskette. So ist es notwendig, Zielgrößen nicht nur im Vorrhinein zu planen, sondern auch die angefallenen Daten aus der Produktion entsprechend zu aggregieren, beispielsweise durch Vorgaben des bereits genannten CO₂-Fußabdrucks. Dies ermöglicht eine Betrachtung des gesamten Produkts in der Connected World, etwa mit der Nutzung als Komponente in einem weiteren Produkt. Anforderungen resultieren in der Erfassung relevanter Produktionsdaten entlang der Wertschöpfungskette (A4.1) sowie der Aggregation dieser in erforderlichen Zielgrößen (A4.2).

5 Reifegrad der Verwaltungsschale

Im Folgenden wird die Bereitschaft der VWS für den Einsatz entlang Wertschöpfungsketten analysiert. Dazu erfolgt im ersten Schritt eine Analyse anhand der identifizierten Reifegradmodelle für digitale Zwillinge. Im Weiteren erfolgt die Analyse hinsichtlich der entworfenen Anwendungsfälle aus RAMI 4.0 mit ihren abgeleiteten Anforderungen. Die Grundlage der Bewertung bildet die offizielle Standardisierung der IDTA.

5.1 Analyse anhand der Reifegradmodelle

Die Analyse der VWS anhand der Reifegradmodelle erfolgt auf Basis der oben genannten veröffentlichten Spezifikationen der IDTA sowie der in Entwicklung befindlichen Spezifikation „Security“ (IDTA 01004-3-0) in [26]. Sie umfasst eine Analyse anhand der Reifegradebenen und der Digital Twin Capabilities Periodic Table.

Eine Zusammenführung der Reifegradebenen aus der Literatur ist in **Tabelle 1** zu finden. Darin ist auch die Klassifizierung der Verwaltungsschale zu den verschiedenen Ebenen zu sehen, welche im Folgenden erläutert wird.

Angesichts dieser Reifegradbewertung dient die VWS primär der standardisierten Beschreibung des digitalen Objekts mithilfe des Metamodells und definierten Datentypen und kann somit als Grundlage für alle Ebenen dienen. Eine Typ-VWS kann beispielsweise der Ebene ohne physische Komponente zugeordnet werden, während eine Instanz durch den Bezug zur eindeutigen physischen Komponente für die Ebenen 1 bis 5 dient. Während die

passive VWS als Datei mit spezifiziertem AASX-Format auf Ebene des digitalen Modells einzuordnen ist, kann die reaktive VWS mit API-Zugriff ergänzend auf Ebene 2 und 3 verortet werden.

Für die Beschreibung der bilateralen Kommunikation der VWS mit dem Asset können die Teilmodelle „Asset Interfaces Description“ (IDTA 02017-1-0) und „Asset Interfaces Mapping Configuration“ (IDTA 02027-1-0) verwendet werden. Auf einer reaktiven VWS aufbauende Anwendungen können aber auch die Ebenen 4 und 5 betreffen, werden diesen jedoch durch den spezifischen Anwendungsfall nicht direkt zugeordnet. Die proaktive VWS soll in Ergänzung ein agentenähnliches Verhalten erlauben, womit alle definierten Reifegradebenen abgebildet werden könnten. Die Ausgestaltung der proaktiven VWS kann jedoch in den genannten Standards nicht vorgefunden werden, sondern ist Gegenstand der Forschung.

Die Bewertung der VWS in Bezug auf die PCT zeigt **Bild 2**. Erfüllte Fähigkeiten durch die Spezifikation sind farblich hervorgehoben und werden im Folgenden exemplarisch erläutert, während die unerfüllten verblasst sind.

Wie in Bild 2 dargestellt, werden vor allem Fähigkeiten in der Kategorie der Daten-Dienste als erfüllt angesehen, welche auf die standardisierte Beschreibung des Metamodells sowie der API für den Zugriff der VWS auf Servern zurückzuführen sind. Da die Verwaltungsschale selbst, bis auf den Zugriff der API, nicht ihre softwareseitige Implementierung oder Funktionen zur Datenverarbeitung, Anzeige oder Management spezifiziert, erfolgt die Analyse vorwiegend anhand des Metamodells der VWS. Beispielsweise unterstützt das Metamodell Typen und Einheiten von Werten, eine Transformation der Daten und erlaubt durch semantische Zusammenhänge und referenzierte Ontologien in Form von Conceptdescriptions eine Kontextualisierung der Daten. Durch Submodell-Elemente, wie eingehende und ausgehende Events, kann eine asynchrone Integration unterstützt werden.

Ein Modell Repository besteht wiederum aus standardisierten Teilmodellvorlagen. Dabei können erzeugte Verwaltungsschalen mit definiertem Zugriff über eine Representational-State-Transfer (REST)-API in einem Repository gespeichert werden. Durch entsprechende Registries kann mit Deskriptoren der VWS auch eine verteilte Datenhaltung der VWS unterstützt werden. In Bezug auf Simulations- und KI-Modelle dient die VWS weniger als eigenes Repository, sondern unterstützt mit standardisierten Teilmodellen wie „Provision of Simulation Models“ (IDTA Nr. 02005) oder „Artificial Intelligence Model Nameplate“ (IDTA Nr. 02060) deren Verweis.

Für die Integration steht die bereits genannte Spezifikation der REST-API zur Verfügung. Dabei können bestehende Anwendungen die Verwaltungsschale auch zum Beispiel aus Unterneh-

The table is a grid of 12 columns and 7 rows, representing a periodic table of digital twin capabilities. The columns are color-coded: light blue for Data Services, orange for Integration, dark blue for Intelligence, teal for UX, grey for Management, and red for Trustworthiness. The rows represent different levels of maturity or scope, from Data Collection and Generation to Governance and Resilience.

Datenerfassung und -ingestion		Generierung synthetischer Daten		Integration in Unternehmenssysteme		Suche		Vorhersage		Grundlegende Visualisierung		Dashboards	
Daten-Streaming	Ontologie-Management	Integration in Engineering-Systeme	Integration in DZ Model-Repository	Kommando & Kontrolle	Künstliche Intelligenz	OT/IoT-Systemintegration	Orchestrierung	Präskriptive Empfehlungen	Warnungen und Benachrichtigungen	Föderiertes Lernen	Business-Regeln	Fortgeschrittene Visualisierung	Continuous Intelligence
Daten-Transformation	Digitaler Zwilling (DZ) Model-Repository	Digitaler Zwilling - Integration	Domänen spezifische Datenverwaltung	Berichterstattung	Simulation	Integration von Collab-Plattformen	Datenanalyse & Analytik	Mathematische Analytik	Zusammensetzung	Distributed Ledger & intelligente Verträge	Echzeit-Überwachung	Visualisierung von Entitätsbeziehungen	Business Intelligence
Kontextualisierung von Daten	DZ-Instanz-Repository	API-Dienste	Repository für Simulationsmodelle	Geräte-Management	Ereignisaufzeichnung	Asynchrone Integration	AI-Modell-Repository	System monitoring	Datenverwaltung	Geräte-Sicherheit	Datenschutz	Erweiterte Realität (AV/VR/MR)	BPM und Arbeitsabläufe
Batch-Verarbeitung	Datenpeicherung und Archivierungsdienste	Geräte-Management	Geräte-Sicherheit	System monitoring	Datenverschlüsselung	Verarbeitung in Echtzeit	AI-Modell-Repository	Datenverwaltung	Vertrauenswürdigkeit	Verantwortung	Safety	Gamification	Spiele-Engine-Visualisierung
Verarbeitung in Echtzeit	Repository für Simulationsmodelle	Ereignisaufzeichnung	Vertrauenswürdigkeit	Datenverwaltung	Verantwortung	Asynchrone Integration	AI-Modell-Repository	System monitoring	Resilienz	Verantwortung	Zuverlässigkeit	3D-Rendering	Resilienz
Asynchrone Integration	AI-Modell-Repository	Verantwortung	Resilienz	System monitoring	Resilienz	Daten-Aggregation	AI-Modell-Repository	System monitoring	Resilienz	Resilienz	Resilienz	Resilienz	Resilienz
Daten-Aggregation	AI-Modell-Repository	Resilienz	Resilienz	System monitoring	Resilienz								

Legend: ● Daten-Dienste ● Integration ● Intelligenz ● UX ● Management ● Vertrauenswürdigkeit

Bild 2. Fähigkeiten der VWS anhand der Digital Twin Capabilities Periodic Table. Grafik: in Anlehnung an [23]

menssystemen on demand erzeugen, sind hier jedoch adäquat durch den Anwendungsbezug nicht hervorgehoben. Dasselbe gilt für die Kategorie des Managements, in der lediglich das Geräte-Management unter Verweis auf die Teilmodell-Spezifikation „Plant Asset Management“ (IDTA Nr. 02019) hervorgehoben werden kann.

In der Kategorie der Intelligenz zeigt sich durch die noch nicht vorhandene Spezifikation proaktiver Verwaltungsschalen ebenfalls der nicht berücksichtigte Anwendungsbezug. Dennoch ist die Suche vorzufinden, welche bisher bereits über eine Discovery zum Beispiel anhand der Asset-ID geschehen kann. Erweitert wird diese um die Query Language, welche eine vereinfachte Grammatik der Resource Query Language (RQL) darstellt und derzeit in der Version 3.1 der API-Spezifikation in Entwicklung ist [27]. Die Eigenschaften „Kommando und Kontrolle“, sowie „Warnung und Benachrichtigung“ können in Anwendungen durch Submodell-Elemente, wie Operationen und Events, ermöglicht werden. Die Zusammensetzung kann, ähnlich wie die Visualisierung der Entitätsbeziehung in der Kategorie „User-Experience“ (UX) durch Referenzen ermöglicht werden. Die weitere grundlegende Visualisierung in der Kategorie UX ist einerseits durch die Lesbarkeit serialisierter Formate oder generische Tools zum Anzeigen und Editieren beliebiger Verwaltungsschalen gegeben, auch wenn diese nicht Teil der hier berücksichtigten Spezifikation sind.

Bei der Vertrauenswürdigkeit wird durch die Aspekte der Standardisierung der IDTA der Aspekt der Verantwortung in dieser als gegeben angesehen. Für die Security befindet sich derzeit die bereits genannte gleichnamige Spezifikation in Entwicklung. Diese sieht Zugriffsregeln auf die Verwaltungsschale und ihre Elemente nach dem Attribute Based Access Control (ABAC) vor, welche Access-Tokens für den Zugriff nutzen.

Der Überblick über die Reifegrade und Fähigkeiten zeigt, dass der Schwerpunkt auf der Modellierung, dem Verweis und dem Zugriff auf die verschiedenen Daten eines Assets liegt. Dies gleicht dem Fokus auf die unteren beiden Reifegrade der Verwaltungsschale und die Daten-Dienste. Die weiteren Ebenen der Reifegrade sowie Fähigkeiten im Bereich der Intelligenz werden

vor allem durch die proaktive Verwaltungsschale als ermöglicht, wenn auch noch nicht standardisiert, angesehen.

5.2 Analyse anhand der Anwendungsfälle

Für die Bereitschaftsanalyse der VWS hinsichtlich der entworfenen Anwendungsfällen wurden zunächst alle veröffentlichten Teilmodell-Spezifikationen auf ihren Beitrag zu den Anforderungen aus Kapitel 4 analysiert. Der Beitrag relevanter Spezifikationen der IDTA sowie identifizierte Lücken werden in **Tabelle 2** vorgestellt.

Neben den veröffentlichten Spezifikationen werden ebenfalls mögliche zugehörige Teilmodell-Spezifikationen in Entwicklung genannt. Da diese nicht öffentlich einsehbar sind, werden sie nur genannt und nicht in die Analyse des möglichen Beitrags oder identifizierte Lücken einbezogen.

Bei der Analyse der veröffentlichten Teilmodelle wurden weitere Punkte mit Relevanz für eine Reifegradbewertung der VWS festgestellt, welche im Folgenden kurz genannt werden:

- Die Spezifikationen im PDF-Format sind nicht für alle Teilmodelle mit den AASX- und JSON-Dateien identisch. Beispielsweise fehlen Kardinalitätsangaben in den AASX- und JSON-Dateien (exemplarisch IDTA 02034-1-0) oder Angaben weichen voneinander ab (zum Beispiel semantische ID, Beschreibungen und Kardinalitäten in IDTA 02013-1-0).
- Über die Spezifikationen der Teilmodelle hinweg werden unterschiedliche Konventionen verwendet. Beispielsweise für Kardinalitäten als Teil des Qualifiers welche als Multiplicity, Cardinality und SMT/Cardinality vorzufinden sind.
- In verschiedenen Teilmodellen besteht die Möglichkeit eigene Submodell-Elemente aufzunehmen. Diese werden einerseits nicht einheitlich in der Standardisierung beschrieben. Andererseits bestehen keine Konventionen oder Anhaltspunkte für deren IDs oder notwendige Eigenschaften einer Domäne, wodurch eine Interoperabilität im Rahmen des Standards nicht sichergestellt ist.

Wie in der Übersicht zu sehen, wurden verschiedene Lücken identifiziert hinsichtlich der Anforderungen aus entworfenen Use

Tabelle 2. Beitrag der VWS-Spezifikationen zu den Anwendungsfällen.

Anwendungsfall	Anforderung	Relevante veröffentlichte VWS-Spezifikationen der IDTA	Beitrag	Identifizierte Lücken	Mögliche zugehörige IDTA-Spezifikationen in Entwicklung
A1: Auflösung von Zielkonflikten	A1.1: funktionale Beschreibung von Produkten	<ul style="list-style-type: none"> – Generic Frame for Technical Data for Industrial Equipment in Manufacturing (IDTA 02003-1-2) 	<ul style="list-style-type: none"> – Klassifikation von Produkten anhand Standards wie ECLASS 	<ul style="list-style-type: none"> – Definition notwendiger technischer Eigenschaften und deren Semantik zur funktionalen Beschreibung für verschiedene Domänen. 	<ul style="list-style-type: none"> – Interface Connectors (IDTA 02062)
		<ul style="list-style-type: none"> – Handover Documentation (IDTA 02004-1-2) 	<ul style="list-style-type: none"> – Generische Bereitstellung technischer Eigenschaften 		<ul style="list-style-type: none"> – Intelligent Information for Use (IDTA 02063)
		<ul style="list-style-type: none"> – Asset Interface Description (IDTA 02017-1-0) 	<ul style="list-style-type: none"> – Dateibasierte technische Dokumentation 	<ul style="list-style-type: none"> – Kennzeichnung des Anwendungsbereichs und Funktionsumfang eines Produkts. 	<ul style="list-style-type: none"> – ECAD (IDTA 02074)
		<ul style="list-style-type: none"> – Provision of 3D Models (IDTA 02026-1-0) 	<ul style="list-style-type: none"> – Beschreibung digitaler Schnittstellen für den Abruf von Daten oder das Auslösen von Aktionen 		
			<ul style="list-style-type: none"> – Dateibasierte Bereitstellung von 3D-Modellen mit Kennzeichnung derer Verwendungsmöglichkeit 		
	A1.2: angebotene Services	<ul style="list-style-type: none"> – Provision of Simulation Models (IDTA 02005-1-0) 	<ul style="list-style-type: none"> – Beschreibung eines verfügbaren Simulationssmodells für ein Asset als möglicher Engineering-Service 	<ul style="list-style-type: none"> – Generische Beschreibung verfügbarer Services eines Unternehmens 	
				<ul style="list-style-type: none"> – Spezifische Beschreibung für Produktions-, Logistik- und Engineering-Dienstleistungen 	
	A1.3: Varianten	<ul style="list-style-type: none"> – Digital Nameplate for industrial equipment (IDTA 02006-3-0) 	<ul style="list-style-type: none"> – Zugehörigkeit eines Produkts zu Produktstamm und Produktfamilie 	<ul style="list-style-type: none"> – Information zugehöriger Produktvarianten zu einer Produktfamilie 	
				<ul style="list-style-type: none"> – Kennzeichnung möglicher Konfigurationsvarianten eines Produkt-Typs 	
	A1.4: multikriterielle Kosten			<ul style="list-style-type: none"> – Kosten (Monetär, Zeitlich, Qualität, Nachhaltigkeit, etc.) für spezifische Ausprägungen von Produkt-Typen 	<ul style="list-style-type: none"> – Purchase Order Creation (IDTA 02050)
					<ul style="list-style-type: none"> – Purchase Request Notification (IDTA 02051)
					<ul style="list-style-type: none"> – Purchase Request Response (IDTA 02052)

A2: Anpassung von Produkt-Typen	A2.1: Verwendete Komponenten und Services	– Hierarchical Structures enabling Bills of Material (IDTA 02011-1-0)	– Hierarchische Stückliste eines Produkts mit Verweis auf Verwaltungsschalen der Subkomponenten	– Information über benötigte Services zur Herstellung	– Bill of Process (IDTA 02031)
	A2.2: Beschreibung der Produktänderung			– Beschreibung der Änderung von Produkten	– Product Change Notifications for Industrial product types and items in manufacturing (IDTA 02036)
	A2.3: Integration in Wertschöpfungsketten			– Verweis der Verwendung von angebotenen Services und Produkten in Wertschöpfungsketten	
A3: Veränderliche Rahmenbedingungen	A3.1: Kenntnis von Rahmenbedingungen			– Information über die Einflussfaktoren der Produktion in der Connected-World	
	A3.2: Abhängigkeit der Produkte			– Kenntnis über Abhängigkeit der Produkte von den Einflussfaktoren	
A4: Transparenz von Wertschöpfungsketten	A4.1: Erfassung relevanter Produktionsdaten	– Carbon Footprint (IDTA 02023-0-9)	– Normgerechte Dokumentation des CO ₂ -Fußabdrucks entlang der Wertschöpfungskette	– Adäquate Erfassung und Aggregation weiterer Zielgrößen der Produktion	– Digital Quality Document (IDTA 02065)
	A4.2: Aggregation in Zielgrößen			– Fehlende Übersicht aggregierter Zielgrößen	

Cases des RAMI 4.0. Auch durch Abschätzung aktueller in Entwicklung befindlicher Spezifikationen ist deren vollständige Schließung nicht zu erwarten. Daraus resultiert ein notwendiger Handlungsbedarf, um den Reifegrad der VWS für die entworfenen Use Cases zu steigern.

6 Zusammenfassung

Software-defined Value Networks (SDVN) können zur Bewältigung steigender Volatilität und Unsicherheit in Wertschöpfungsketten beitragen. Für die dafür benötigte unternehmensübergreifende Interoperabilität sind Standards wie die Verwaltungsschale erforderlich, die auszutauschende Modelle digitaler Zwillinge mit einem Metamodell und Teilmödellen spezifiziert. Neben verschiedenen Anwendungen und verfügbaren Werkzeugen für die Verwaltungsschale ist keine Analyse ihres technologischen Reifegrads als digitaler Zwilling für den Einsatz entlang Wertschöpfungsketten zu finden.

Im Beitrag erfolgt einerseits die Analyse der Verwaltungsschale als standardisierter digitaler Zwilling anhand vorhandener Reifegradsmodelle und der Digital Twin Capabilities Periodic Table. Andererseits erfolgt eine Analyse anhand exemplarisch aufgestell-

ter Anwendungsfälle eines SDVN entlang des Lebenszyklus mittels des RAMI 4.0. Ergebnisse zeigen den Fokus der Datenmodellierung der VWS, die vor allem durch die noch nicht vorhandene Spezifikation proaktiver Verwaltungsschalen Potenzial zur Erhöhung des Reifegrads bietet.

Eine generische Reifegradbewertung für die Orchestrierung eines SDVN ist durch die beispielhaft entworfenen Anwendungsfälle nicht möglich. Feststellungen aus deren individuellen Bewertung zeigen im Überblick jedoch eine vorhandene Reife in der generischen Beschreibung von Produkten. Eine weitere Erhöhung des Reifegrads wird vor allem in der Beschreibung von Varianten sowie der domänen spezifischen Ausgestaltung standardisierter Teilmodelle mit Möglichkeit für beliebige Einträge gesehen. Bei den ebenfalls eingeführten Services ist ein geringerer Reifegrad durch fehlende Modelle festzustellen, welche sich, wie zu sehen, ebenfalls auf deren Verknüpfung mit Produkten entsprechend dem PPR-Modell auswirken.

Zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sollten die genannten Punkte berücksichtigen, um eine interoperable und standardisierte Orchestrierung mithilfe der VWS in SDVN zu ermöglichen und ihren Reifegrad weiter zu steigern.

FÖRDERHINWEIS

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in der Fördermaßnahme „Forschungscampus öffentlich-private Partnerschaft für Innovationen“ (02P23Q820) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

LITERATUR

- [1] Catena-X Automotive Network e.V.: Homepage. Internet: catena-x.net. Zugriff am 16.04.2025
- [2] Neubauer, M.; Frick, F.; Ellwein, C. et al.: Ein Paradigmenwechsel für die industrielle Produktion. *wt Werkstatttechnik online* 112 (2022) 06, S. 383–389. Internet: www.werkstatttechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [3] Dietrich, D.; Zürn, M.; Reiff, C. et al.: Software-Defined Value Networks: Motivation, Approaches, and Research Activities. In: Bauernhansl, T.; Verl, A.; Liewald, M. et al. (Hrsg.): *Production at the Leading Edge of Technology*. Cham: Springer Nature Switzerland 2024, pp. 514–524
- [4] Dietrich, D.; Zürn, M.; Briem, A.-K. et al.: Software-Defined Value Networks: Industrial Requirements and Research Gap. In: Holder, D.; Wulle, F.; Lind, J. (eds.): *Advances in Automotive Production Technology – Digital Product Development and Manufacturing*. Stuttgart Conference on Automotive Production (SCAP2024). Cham: Springer International Publishing 2024, [erscheint am 10.6.2025]
- [5] Neubauer, M.; Steinle, L.; Reiff, C. et al.: Architecture for manufacturing-X: Bringing asset administration shell, eclipse dataspace connector and OPC UA together. *Manufacturing Letters* 37 (2023), pp. 1–6
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK (Hrsg.): Whitepaper „Manufacturing-X“: Eckpunkte für die Umsetzung von „Manufacturing-X“ im produzierenden Gewerbe zur Sicherung des Wettbewerbsstandortes Deutschland. Stand: 2022. Internet: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Manufacturing-X_lang.pdf?__blob=publicationFile&v=2. Zugriff am 17.04.2025
- [7] Dietrich, C.; Belyaev, A.; Bock, J. et al.: Information Model for Capabilities, Skills & Services. Stand: 2022. Internet: doi.org/10.22440/publication-477. Zugriff am 17.04.2025
- [8] Dietrich, D.; Neubauer, M.; Lechner, A. et al.: Automated Manufacturing Toolchain using Skill-based Digital Twins. *Procedia CIRP* 128 (2024), pp. 923–928
- [9] Industrial Digital Twin Association e.V.: AAS Spezifikationen. Internet: industrialdigitaltwin.org/content-hub/aasspecifications. Zugriff am 16.04.2025
- [10] Industrial Digital Twin Association e.V.: AAS Submodel Templates. Internet: industrialdigitaltwin.org/content-hub/teilmodelle. Zugriff am 16.04.2025
- [11] VDI/VDE 2193 Blatt 1: Sprache für I4.0-Komponenten. Ausgabe 04 2020
- [12] Industrial Digital Twin Association e.V.: Part 1: Metamodel - IDTA Number: 01001–3–0–1. Internet: industrialdigitaltwin.org/wp-content/uploads/2024/06/IDTA-01001-3-0-1_SpecificationAssetAdministrationShell_Part1_Metamodel.pdf. Zugriff am 16.04.2025
- [13] Wei, K.; Sun, J. Z.; Liu, R. J.: A Review of Asset Administration Shell. 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Macao, 2019, pp. 1460–1465
- [14] Abdel-Aty, T. A.; Negri, E.; Galparoli, S.: Asset Administration Shell in Manufacturing: Applications and Relationship with Digital Twin. *IFAC-PapersOnLine* 55 (2022) 10, pp. 2533–2538
- [15] Jacoby, M.; Baumann, M.; Bischoff, T. et al.: Open-Source Implementations of the Reactive Asset Administration Shell: A Survey. *Sensors* 23 (2023) 11, doi.org/10.3390/s23115229
- [16] Rahal, J. R.; Schwarz, A.; Sahelices, B. et al.: The asset administration shell as enabler for predictive maintenance: a review. *Journal of Intelligent Manufacturing* 36 (2025) 1, pp. 19–33
- [17] Chen, L.; Xie, X.; Lu, Q. et al.: Gemini Principles-Based Digital Twin Maturity Model for Asset Management. *Sustainability* 13 (2021) 15, #8224
- [18] Kritzinger, W.; Karner, M.; Traar, G. et al.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine* 51 (2018) 11, pp. 1016–1022
- [19] Liu, Y.; Feng, J.; Lu, J. et al.: A review of digital twin capabilities, technologies, and applications based on the maturity model. *Advanced Engineering Informatics* 62 (2024), #102592
- [20] Madni, A. M.; Madni, C. C.; Lucero, S. D.: Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems* 7 (2019) 1, # 7, doi.org/10.3390/systems7010007
- [21] Pronost, G.; Mayer, F.; Marche, B. et al.: Towards a Framework for the Classification of Digital Twins and their Applications. 2021 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), Cardiff, United Kingdom, 2021, pp. 1–7
- [22] iTACs e.V.: Modeling & Simulation SPICE. Stand: 2024. Internet: tacs.info/component/rsfiles/download-file/files?path=SPICE%2BDocuments%252FModeling%2Band%2BSimulation%2BSPICE%252FModeling%2Band%2BSimulation%2BSPICE%2BPAM%2Bv09.pdf&Itemid=1-04. Zugriff am 17.04.2025
- [23] van Schalkwyk, P.; Whiteley, S.; Goldman, M.: Digital twin capabilities periodic table. Internet: www.digitaltwinconsortium.org/initiatives/capabilities-periodic-table/. Zugriff am 16.04.2025
- [24] Hankel, M.; Rexroth, B.: The reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0). ZVEI 2. Stand: 2015. Internet: www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2015/april/Das_Refenzarchitekturmodell_Industrie_4.0__RAMI_4.0__ZVEI-Industrie-40-RA-MI-40-English.pdf. Zugriff am 17.04.2025
- [25] Drath, R.; Mosch, C.; Hoppe, S. et al.: Diskussionspapier – Interoperabilität mit der Verwaltungsschale, OPC UA und AutomationML. Internet: industrialdigitaltwin.org/wp-content/uploads/2023/04/Diskussionspapier-Zielbild-und-Handlungsempfehlungen-fuer-industrielle-Interoperabilitaet-5.3.pdf. Zugriff am 17.04.2025
- [26] Industrial Digital Twin Association e.V.: Part 4: Security (IDTA-01004). Internet: admin-shell.io.github.io/aas-specs-antora/IDTA-01004/v3.0/index.html. Zugriff am 16.04.2025
- [27] Industrial Digital Twin Association e.V.: Part 2: Application Programming Interfaces (IDTA-01002-3-1). Internet: admin-shell.io.github.io/aas-specs-antora/IDTA-01002/v3.1/index.html. Zugriff am 17.04.2025

David Dietrich, M. Sc. 
david.dietrich@isw.uni-stuttgart.de
Tel. +49 711 / 685-82344

Dr.-Ing. Armin Lechner 

Prof.-Dr.-Ing. Alexander Verl 
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)
Universität Stuttgart
Seidenstr. 36, 70174 Stuttgart
www.isw.uni-stuttgart.de

Martin Musser, B. Eng.

DXC Technology Deutschland Consulting GmbH
Alfred-Herrhausen-Allee 3–5, 65760 Eschborn
dxc.com/de/de

LIZENZ



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