

Architektur und Technologiekomponenten eines digitalen Zwillings

M. Klein^{1,3}, B. Maschler^{1,3}, A. Zeller^{1,3}, B. Ashtari Talkhestani^{1,3},
N. Jazdi^{1,3}, R. Rosen², M. Weyrich¹

¹ Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme, Universität Stuttgart; ² Siemens AG, Corporate Technology, München

³ gleichwertiger Beitrag

Kurzfassung

Die Konzepte des digitalen Zwillings werden sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie immer relevanter. Daraus ergeben sich viele verschiedene Sichtweisen. Ein Überblick über das vorherrschende Verständnis wird in diesem Beitrag gegeben. Darüber hinaus werden die notwendigen Aspekte eines digitalen Zwillings erläutert und der Bedarf an zukünftiger Forschung zu Schlüsseltechnologien (Technologiekomponenten) im Kontext digitaler Zwilling begründet. Auf dieser Grundlage werden mögliche Vorteile eines digitalen Zwillings über seinen Lebenszyklus dargestellt. Weiterhin wird in diesem Beitrag ein ausgearbeiteter Vorschlag für die Architektur eines digitalen Zwillings präsentiert. Der Beitrag schließt mit einem Prototyp, in dem Artefakte und Konzepte des digitalen Zwillings eines Lkws exemplarisch implementiert sind.

1. Einleitung

In der industriellen Produktion erfordern individualisierte Massenproduktion [1], [2] und hoher Wettbewerbsdruck [2] eine ständig wachsende Produktivität gepaart mit zunehmender Flexibilität [3] und Rekonfigurierbarkeit [4]. Ein verbreiteter Ansatz zur Bewältigung solcher Herausforderungen ist der Einsatz von cyber-physischen Systemen (CPS) [4].

CPS sind „integrations of computation with physical processes“ [5]. Sie versprechen, die adaptive und intelligente Überwachung, Steuerung und Beeinflussung der physischen Welt zu ermöglichen [6], [7]. Dabei werden jedoch sowohl die CPS selbst als auch ihr Entwurfsprozess immer komplexer, was für ihre Entwickler und Anwender eine erhebliche Herausforderung darstellt [6].

Um diese wahrgenommene Komplexität zu reduzieren, ist eine Automatisierung der kontinuierlichen Synchronisation der verschiedenen digitalen Komponenten eines CPS mit ihren realen Pendanten in Verbindung mit einem höheren Autonomiegrad am Synchronisierungsprozess

ein wichtiger Schritt [6], [8]. Die digitalen Komponenten von CPS, die eine solche automatisierte kontinuierliche Synchronisation und hohe Autonomie in ihrem Verhalten aufweisen, werden allgemein als digitale Zwillinge bezeichnet [8], [9], [10], [11].

2. Begriffsverständnis und Mehrwerte eines digitalen Zwillings

Das Konzept des digitalen Zwillings ist relativ neu und eine klar definierte, standardisierte Terminologie ist noch nicht gegeben [12], [13]. Allerdings konnten vier Artefakte für eine Definition eines digitalen Zwillings sowohl aus dem Bereich der Wissenschaft als auch aus der Industrie durch eine systematische Untersuchung bestehender Ansätze identifiziert werden. Demnach sind

- eine digitale/virtuelle Repräsentanz [14], [15], [16] [17], [18], [19], [20],
- ein (bidirektionaler) Informationsaustausch zwischen physischer und virtueller Welt [20], [21],
- eine Lebenszyklusbetrachtung [11], [15], [17], [20], [22], [23], [24]
- als auch die Zusammensetzung aus unterschiedlichen, teilweise zur Simulation geeigneten, Modellen [8], [15], [22], [25], [26], [27]

wichtige Bestandteile eines digitalen Zwillings.

Generell scheint es einen weitgehenden Konsens zwischen den meisten Definitionen zu geben, digitale Zwillinge ganz allgemein als „virtual digital representation of physical assets“ im Sinne des Glossars Plattform Industrie 4.0 [28] zu betrachten. Da das Konzept des digitalen Zwillings darüber hinaus jedoch eine Kombination vieler Aspekte (z.B. Austauschformate, Kommunikation, Wissensverarbeitung u. v. m.) darstellt und eine Fusion dieser Teilaspekte erfordert, besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

Der digitale Zwilling als digitales Gegenstück des physischen Systems generiert mehrere potenzielle Vorteile. Er ermöglicht eine detaillierte Multi-Domain-Simulation während der Engineering-Phase [29]. Somit ist er ein Instrument zur Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen Domänenexperten, da komplexe Szenarien durch Simulationen besser erklärt werden können [16]. Durch den Einsatz des digitalen Zwillings wird eine zehn prozentige Steigerung der Effizienz prognostiziert [30]. Im Anschluss an die Integration von unterschiedlichen digitalen Modellen, kann eine virtuelle Inbetriebnahme durchgeführt werden. Dies reduziert die aktuelle Inbetriebnahmezeit [29]. Auch können die Engineering-Modelle während des Betriebs verwendet werden, um eine schnellere Systemrekonfiguration zu ermöglichen [29]. Durch die Echtzeitüberwachung ermöglicht der digitale Zwilling eine schnelle Reaktion auf Zustandsänderun-

gen (z.B. Anomalien) [16], [31]. Zusätzlich kann die Korrelation von Echtzeitdaten mit historischen Daten und Umweltinformationen die Durchführung der (vorbeugenden) Instandhaltung unterstützen [31].

3. Technologien für die Entwicklung und Nutzung des digitalen Zwillings

Ein digitaler Zwilling beinhaltet sehr viele unterschiedlichen Modelle, von ihnen manche ausführbar sind. Ausführbare Modelle werden auch als Simulationsmodelle bezeichnet. Diese heterogenen Modelle bilden die Grundlagen für die Vielfalt der Aspekte eines digitalen Zwillings. Diese Heterogenität ist eine der großen Herausforderungen für das Konzept des digitalen Zwillings. Zur Realisierung der beschriebenen Anwendungsfälle ist ein kontinuierlicher Informationsfluss zwischen den heterogenen Modellen notwendig. Darüber hinaus werden Technologien benötigt, welche Modellinformationen nutzen. Co-Simulation und Kognition sind Technologien, welche diese Herausforderung der Heterogenität adressieren und in vielen Anwendungsbereichen bereits etabliert sind. Diese bedürfen aber Anpassungen und Erweiterungen, um den Erwartungen an den digitalen Zwilling gerecht zu werden.

3.1 Lebenszyklusübergreifender Informationsfluss basierend auf Austauschformaten

Wie beschrieben, ist der lebenszyklusübergreifende Informationsfluss für die Realisierung eines digitalen Zwillings unerlässlich. Austauschformate realisieren diesen Informationsfluss und ermöglichen somit die Verwendung von Engineering-Modellen während des Betriebs oder die Korrelation von Echtzeitdaten mit historischen Daten. Mehrere Austauschformate, die in einigen Bereichen bereits etabliert sind, gewinnen im Rahmen des digitalen Zwillings zusätzliche Bedeutung.

Aufgrund der zunehmenden Komplexität von Produktionsanlagen ist ein Engineering ohne Modelle nicht mehr vorstellbar. Das Engineering von Produktionsanlagen ist durch unterschiedliche Entwicklungsphasen, unterschiedliche Domänen und eine daraus resultierende starke Arbeitsteilung gekennzeichnet. Je nach Domäne werden verschiedene Sichten auf eine Produktionsanlage erstellt, was sich in der Vielzahl der verwendeten Modellierungssprachen und Modellierungswerkzeugen widerspiegelt. Eine durchgängige Kommunikation und Informationsfluss steigert die Effizienz des Engineerings, des Betriebs, der Optimierung und des Abbaus im Lebenszyklus einer Produktionsanlage signifikant.

Dabei stellt die Aktualität der Modelle eine große Herausforderung für den Erfolg und den Nutzen eines digitalen Zwillings dar. Wenn die Modelle nicht ständig aktualisiert werden, sind die Modelle nicht mit dem aktuellen Zustand des realen Assets konsistent und die Vorteile des digitalen Zwillings können nicht genutzt werden. Die automatisierte Aktualisierung kann nur

durch einen automatisierten Abgleich mit dem realen Asset sowie von Informationen verschiedener Modelle, beispielsweise über Austauschformate, erfolgen.

3.2 Co-Simulation

Aufgrund der hohen Heterogenität von Modellen ist es nicht möglich alle relevanten Aspekte eines Produktionssystems in einem Werkzeug zu modellieren oder zu simulieren. Aus diesem Grund werden verschiedene Aspekte eines Systems üblicherweise mit Hilfe verschiedener Werkzeuge beschrieben. Dies stellt in zahlreichen Anwendungsfällen des digitalen Zwillings eine Herausforderung dar, wie zum Beispiel bei der virtuellen Inbetriebnahme, der Echtzeitüberwachung oder einer simulationsbasierten Optimierung. Für diese Anwendungsfälle ist die Beziehung und Interaktion zwischen Aspekten aus verschiedenen Bereichen von Interesse. So ist es für eine gesamtheitliche Betrachtung notwendig, verschiedene Simulationswerkzeuge zu koppeln – Co-Simulation ("Coupled Simulation").

Sobald mehr als zwei Simulationswerkzeuge an einer Co-Simulation teilnehmen, werden Laufzeitumgebungen benötigt, um die Interaktion der Simulationen zu koordinieren. So müssen die Botschaften den korrekten Adressaten erreichen und die Simulationswerkzeuge zeitlich synchronisiert werden. Für eine effiziente Kopplung haben sich mehrere Co-Simulationsstandards etabliert. Für eine Beschreibung der Co-Simulationsstandards und deren Prinzipien zur Interaktion zwischen den Simulationsteilnehmern sei auf [32] verwiesen.

3.3 Kognition

Im Kontext CPS beschreibt der Begriff „Kognition“ konkrete Funktionalitäten dieser Systeme [33], [34], [35]. Tabelle 1 beschreibt diese unter Bezugnahme auf den in der sogenannten 5C-Architektur festgelegten CPS-Workflow.

Tabelle 1: 5C-Architektur für CPS nach [34] basierend auf [33]

Level	Beschreibung
1 „Connection“	CPS sammeln Daten von verschiedenen Knoten in einem Netzwerk.
2 „Conversion“	CPS verarbeiten Daten und aggregieren sie zu Informationen.
3 „Cyber“	CPS vergleichen Informationen untereinander und über die Zeit.
4 „Cognition“	CPS analysieren und visualisieren Informationen zur Beschreibung ihres eigenen Zustands.
5 „Configuration“	CPS optimieren sich selbst und passen sich wechselnden Umgebungen selbstständig an.

Die Stufe 4 dieser 5C-Architektur wird als "Kognition" bezeichnet, weil sie ein hohes Maß an analytischer Fähigkeit auf der Grundlage vielfältiger Daten (Wahrnehmung) bereithält, ohne jedoch eigenständig auf die resultierenden Erkenntnisse (Wissen) zu reagieren.

Nach dem in Kapitel 2 dargestellten Begriffsverständnis, ist ein digitaler Zwilling mehr als eine bloße Sammlung von digitalen Modellen eines physischen Objekts. Es handelt sich um eine virtuelle Darstellung eines solchen Objekts und erfordert daher die Sammlung von Daten aus dem physischen Asset, die Konvertierung und Aggregation dieser Daten sowie ihre Anreicherung mit Informationen aus anderen Quellen, zum Beispiel aus seiner Umgebung. Von einem digitalen Zwilling kann man also nur sprechen, wenn seine Fähigkeiten mindestens die ersten drei der fünf 5C-Architekturstufen umfassen. Ein maximal vorteilhafter, d.h. autonomer, digitaler Zwilling würde jedoch darüber hinausgehen [6]. Er wäre mit einem Informationssystem gekoppelt, das Funktionen zur Selbstkonfiguration, Selbstanpassung und Selbstoptimierung bereitstellt – zum Beispiel um eine vom Menschen unabhängige Inbetriebnahme, Nutzung oder Rekonfiguration zu ermöglichen – und würde daher auch die Ebenen 4 und 5 der 5C-Architektur umfassen [36]. Eine Untersuchung [34] ergab, dass die Stufen 3 bis 5 der 5C-Architektur noch nicht in Industrieanwendungen angekommen sind. Mehr noch, es gibt starke Hinweise darauf, dass die Ebenen 4 und 5 der 5C-Architektur nicht einmal auf breiter Basis untersucht werden. Da höhere Ebenen auf niedrigeren Ebenen aufbauen, muss der unmittelbare Forschungsschwerpunkt daher auf der Kognitionsebene liegen, um die Schaffung fortschrittlicher digitaler Zwillinge, das heißt digitaler Zwillinge mit einem Informationssystem zur Erweiterung ihrer Funktionalitäten, fortzusetzen.

4. Architektur für die Interaktion zwischen digitalen Zwillingen und ihrer Umgebung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden verschiedene Bestandteile für einen digitalen Zwilling vorgestellt. Um die Potenziale eines digitalen Zwillings auszuschöpfen, ist darüber hinaus eine Architektur zu dessen Strukturierung notwendig. Sie regelt, auf welche Weise die verschiedenen Technologien hinter dem digitalen Zwilling zusammenarbeiten und Daten und Informationen austauschen können und stellt damit auch die Grundlage für weitergehende Intelligenzfunktionalitäten dar. Eine solche Architektur, welche in Bild 1 skizziert ist, wird im Folgenden erläutert.

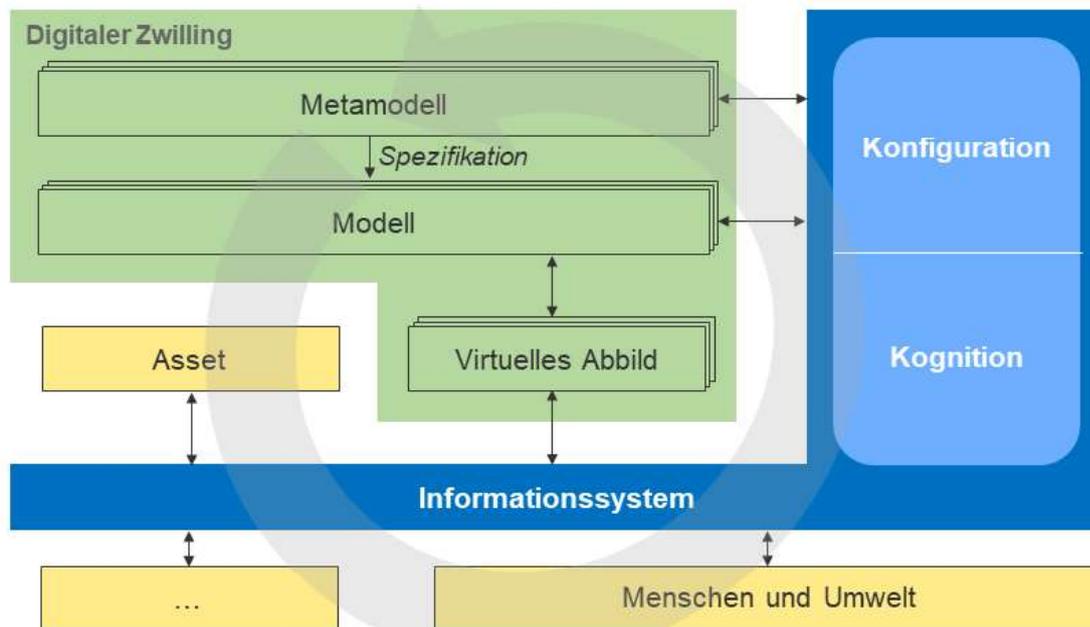


Bild 1: Architektur für die Interaktion zwischen digitalen Zwillingen und ihrer Umgebung

Die Basis für den digitalen Zwilling ist das Asset, also eine "Einheit, die einen Wert für ein Unternehmen hat und individuell verwaltet wird" [37]. Basierend auf dem eingeführten Begriffsverständnis eines digitalen Zwillings können dessen Hauptkomponenten in drei Komponenten unterteilt werden: Metamodelle, Modelle und virtuelle Abbilder des Assets, die jeweils verschiedene Aspekte eines digitalen Zwillings darstellen können.

Abhängig von Lebenszyklusphase und Domäne werden unterschiedliche Modelle für ein und dasselbe physische Objekt erstellt und genutzt. Der digitale Zwilling eines realen Assets besteht aus all diesen verschiedenen Modellen und ihren Beziehungen, die wiederum aus Metamodelle abgeleitet sein können [38]. Diese müssen konsistent sein und die Merkmale und Funktionen des Assets während seines gesamten Lebenszyklus ausreichend widerspiegeln.

Sie müssen jederzeit mit dem tatsächlichen Zustand des Assets synchronisiert sein, so dass verschiedene virtuelle Abbilder eines Assets hinsichtlich unterschiedlicher Aspekte verfügbar sind [39].

Darüber hinaus muss ein digitaler Zwilling in der Lage sein, nicht nur den aktuellen, sondern auch vorherige Zustände des Assets darzustellen. Dementsprechend muss ein digitaler Zwilling die aktuellen und historischen Prozessdaten eines Assets enthalten, um seinen Zustand während des gesamten Lebenszyklus widerzuspiegeln. In diesem Rahmen enthält ein virtuelles Abbild hinsichtlich der betrachteten Aspekte alle Prozessdaten des jeweiligen Assets.

Um die Kommunikation zwischen dem digitalen Zwilling und der realen Welt zu ermöglichen, ist ein Informationssystem erforderlich, das Daten aus dem realen Asset und dem digitalen Zwilling über verschiedene Schnittstellen sammelt und verarbeitet. Ein Informationssystem kombiniert Hardware, Software und Telekommunikationsnetze, die zur Sammlung, Verarbeitung, Speicherung und Verbreitung von Informationen zusammenarbeiten, um die Entscheidungsfindung, Koordination, Steuerung, Analyse und Visualisierung in einer Organisation zu unterstützen [40]. Das Informationssystem muss einen Zugriff auf das virtuelle Abbild erlauben. Dieser Zugriff ermöglicht es Benutzern, beispielsweise den aktuellen Zustand des Assets anzuzeigen oder sein virtuelles Abbild auf eine der zuvor beschriebenen Arten zu verwenden. Zusätzlich können fortgeschrittene Funktionalitäten auf Grundlage von Künstliche Intelligenz (Ebenen 4 und 5 der 5C-Architektur, siehe oben) in das Informationssystem integriert werden. Integraler Bestandteil der Architektur ist die fortwährende gegenseitige Beeinflussung - dargestellt durch den überlagerten, grauen Zyklus Pfeil - von digitalem Zwilling und realem Asset: Zur Entwurfszeit wird auf Basis digitaler Abbilder das reale Asset entwickelt und anschließend produziert. Anschließend werden beide fortwährend synchronisiert und gemeinsam für Optimierung, Rekonfiguration, Recycling oder Entsorgung genutzt.

5. Prototypische Implementierung eines digitalen Zwillings anhand der Architektur

Um Vorteile des digitalen Zwillings aufzuzeigen, wurde ein Use-Case im Bereich der Produktionslogistik gewählt. Die Produktionslogistik stellt einen wichtigen Bestandteil der Just-in-Time-Produktion dar, damit die richtigen Waren zur richtigen Zeit am richtigen Ort sind. Der hierbei beschriebene Use-Case stellt eine direkte Verbindung zwischen dem Produkt und dem Produktionssystem her.

5.1 Beschreibung des Hardware-Aufbaus

In Bild 2 d) ist der Lkw-Prototyp dargestellt. Er besteht aus einer Zugmaschine und einem Anhänger. Auf dem Anhänger ist ein Tanksystem installiert, das aus drei Tanks besteht. Ein

Tank beinhaltet einen Akku zum Betreiben des Systems. Im zweiten Tank ist die gesamte Elektronik untergebracht und der dritte Tank enthält die eigentliche Ladung (gelbe Kunststoffkugeln). Dieser ist mit einem Ultraschallsensor ausgestattet, der zur Überwachung des Füllstands verwendet wird. Zusätzlich sind unter diesem Tank zwei Wägezellen installiert, so dass das Gewicht der gesamten Ladung und dessen Änderung bestimmt werden kann. Zur Bestimmung der Außen- und Ladungstemperatur wurden auch Temperatursensoren installiert. Ein Lüfter reagiert auf Temperaturanstiege und kühlt die Ladung. Darüber hinaus erkennt ein Lagesensor, die aktuelle Ausrichtung des Anhängers. Des Weiteren kann ein Ablassventil angesteuert werden, um den Füllstand der Ladung zu variieren. Die Sensorik und Aktorik ist an einen Raspberry Pi angeschlossen, welcher den Lkw-Tank überwacht und steuert.

5.2 Digitaler Zwilling des realen Assets

Für den oben beschriebenen Hardwareaufbau wurde ein digitaler Zwilling auf Basis verschiedener Modelle und deren Metamodelle erstellt. Bild 2 zeigt die implementierten Bestandteile der zuvor vorgestellten Architektur:

- a) Modelle, die verschiedene Blickwinkel des Fahrzeugs beschreiben
- b) Instanzen von Ontologien, die das Wissen über den Aufbau des Lkws beschreiben
- c) Ontologien, die domänenspezifisches Wissen beschreiben
- d) Hardware-Aufbau des Lkw
- e) Visualisierung der künstlichen Intelligenz
- f) Definition von Austauschformaten zur Konvertierung von Modellinformationen
- g) Benutzungsoberfläche
- h) Co-Simulation zur Überwachung des Füllprozesses
- i) Modell zur Visualisierung des aktuellen Zustands des Lkws
- j) Übersicht über Prozessdaten

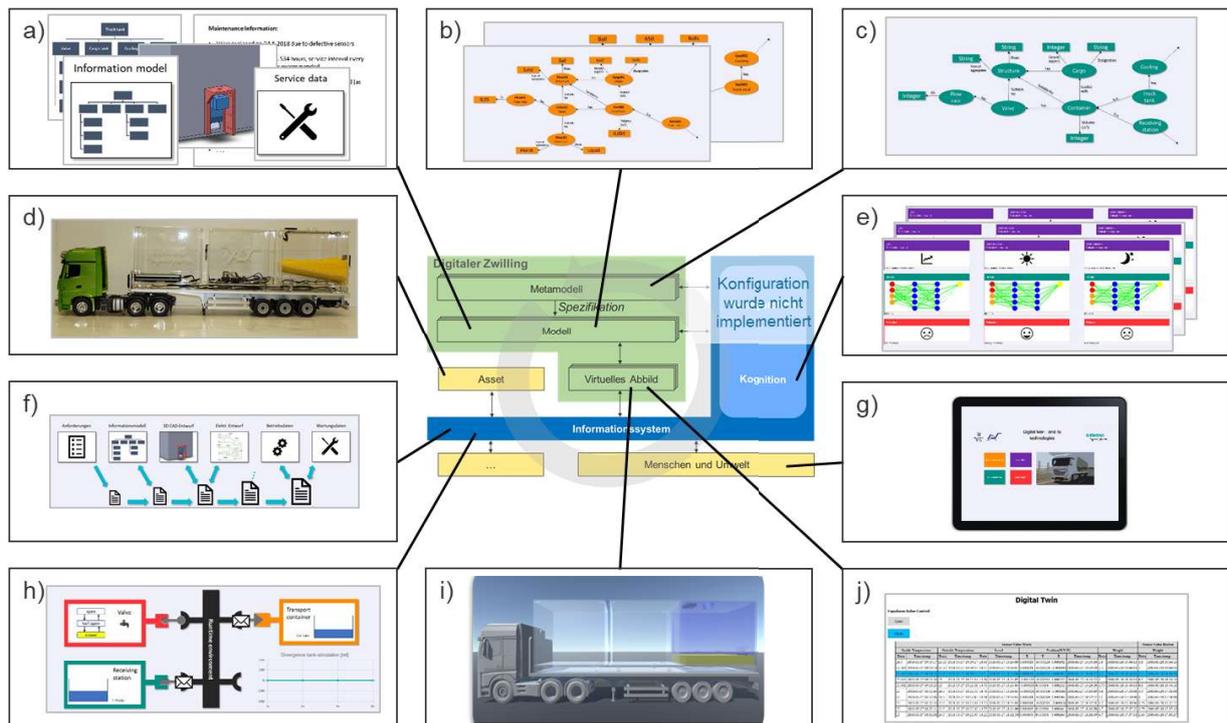


Bild 2: Prototypische Implementierung eines digitalen Zwillings

Der entwickelte digitale Zwilling nutzt verschiedene Technologien in einem Informationssystem wie Co-Simulation, Wissensrepräsentation und Kognition, um verschiedene Szenarien zu demonstrieren. Er beinhaltet multidisziplinäre Modelle wie CAD-, Elektro-, Informations-, Funktions- und Simulationsmodelle sowie einer Ontologie. Dadurch kann ein lebenszyklus- und bereichsübergreifenden Informationsfluss innerhalb des digitalen Zwillings realisiert werden. Diese Technologien wurden in ein Informationssystem integriert.

Für die Entwicklung des Informationssystems wird ein Netzwerk aus mehreren Raspberry Pi-Mikrocomputern verwendet. Die Co-Simulation ermöglicht die Darstellung des Systemverhaltens durch die Kopplung heterogener Simulationsmodelle. So können Prozessabläufe in Echtzeit simuliert werden. In dem Informationssystem stellt die Co-Simulation die Interaktion zwischen dem Tank und einer Entladestation dar. Auf dem Informationssystem des Demonstrators wurden kognitive Funktionalitäten integriert, die die aktuellen Betriebsdaten des Systems mit verschiedenen intelligenten Algorithmen analysieren und interpretieren können. Damit werden die Möglichkeiten der künstlichen Intelligenz im Kontext des digitalen Zwillings visualisiert. Die Kognition ermöglicht, einen Vorhersagealgorithmus welcher mithilfe verfügbarer Sensordaten, historischen Daten und externen Datenquellen (z.B. Wetterdaten oder Verkehrsdaten) trainiert werden kann. Er dient der Prognose, wie der Transport abläuft und wie sich die Ladung entwickelt. Informationen aus früheren Lebenszyklusphasen oder Informationen von anderen

Fahrzeugen, können dabei für eine vorausschauende Wartung verwendet werden. Zusätzlich verfügt der Demonstrator über eine Benutzungsschnittstelle (HMI) in Form einer Webanwendung. Damit werden die Vorteile eines digitalen Zwillings in den Bereichen Datenaustausch, Ontologien, Kognition und Co-Simulation für Nicht-Experten dargestellt.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Eine Literaturrecherche ergab, dass bei der Definition eines digitalen Zwillings, in weiten Bereichen Konsens besteht. Autoren aus Wissenschaft und Industrie sind sich einig, dass ein digitaler Zwilling eine kontinuierlich synchronisierte virtuelle Nachbildung eines realen Systems ist und Informationen über den gesamten Lebenszyklus der betrachteten Einheit enthält. Er besteht aus verschiedenen Elementen, die zu einer engen Zusammenarbeit zwischen physischen Asset und seinem digitalen Zwilling führen. Eine Verbindung und Kommunikation zwischen diesen Elementen ist notwendig, um das volle Potenzial eines digitalen Zwillings auszuschöpfen.

Weiterhin wurden in diesem Beitrag Schlüsseltechnologien zur Entwicklung und Einsatz des digitalen Zwilling-Konzeptes identifiziert und diskutiert. Aufbauend auf dem Begriffsverständnis und den Schlüsseltechnologien wurde eine Architektur für den digitalen Zwilling präsentiert. Diese Architektur konzentriert sich auf die Technologiekomponenten des digitalen Zwillings und deren Wechselwirkungen bzw. Beziehungen untereinander, zur Umgebung des digitalen Zwillings und zu weiteren digitalen Zwillingen anderer Assets. Zusätzlich hilft die Architektur die Daten und Informationen eines digitalen Zwillings zu strukturieren. Schließlich wurde ein Demonstrator realisiert. Der vorgestellte Demonstrator präsentiert eine prototypische Implementierung des oben genannten Frameworks und veranschaulicht konkrete Vorteile des Digitalen Zwillings in einem logistischen Szenario.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Hart, C. W.L.: Mass customization: conceptual underpinnings, opportunities and limits, *International Journal of Service Industry Management*, 6 (1995) 2, S. 36-45.
- [2] Liu, G. et al. The relationships among functional integration, mass customisation, and firm performance, *International Journal of Production Research*, 50 (2012) 3, S. 677-690.
- [3] Marks, P. et al.: Survey on Flexibility and Changeability Indicators of automated Manufacturing Systems, *IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Turin, 2018, S. 516–523.
- [4] Moghaddam, M. et al.: Reference architectures for smart manufacturing: A critical review, *Journal of Manufacturing Systems*, 49 (2018) S. 215-225.
- [5] Lee, E. A.: Cyber Physical Systems: Design Challenges, *11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, Orlando, 2008, S. 363–369.
- [6] Hehenberger, P. et al.: Design, modelling, simulation and integration of cyber physical systems: Methods and applications, *Computers in Industry*, 82 (2016), S. 273-289.
- [7] Weyrich, M. et al.: Evaluation Model for Assessment of Cyber-Physical Production Systems, *Springer Series in Wireless Technology, Industrial Internet of Things: Cybermanufacturing Systems*, Springer International Publishing, 2018, S. 169–199.
- [8] Rosen, R. et al.: About the Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing, *IFAC-PapersOnLine*, 48 (2015) 3, S. 567–572.
- [9] Kritzinger, W. et al.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification, *IFAC-PapersOnLine*, 51 (2018) 11, S. 1016–1022.
- [10] Anderl, R. et al.: Digital twin technology – An approach for Industrie 4.0 vertical and horizontal lifecycle integration, *IT - Information Technology*, 60 (2018) 3, S. 125–132.
- [11] Grieves, M.: Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication, White Paper, 2014. [Online: http://innovate.fit.edu/plm/documents/doc_mgr/912/1411.0_Digital_Twin_White_Paper_Dr_Grieves.pdf]
- [12] Negri, E.: A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems, *Procedia Manufacturing*, 11 (2017), S. 939–948.
- [13] Wagner, C. et al.: The role of the Industry 4.0 asset administration shell and the digital twin during the life cycle of a plant, *22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Limassol, 2017, S. 1–8.

- [14] Siemens AG: Twins with potential - Digitalization in industry. [Online: <https://www.siemens.com/customer-magazine/en/home/industry/digitalization-in-machine-building/the-digital-twin.html>], letzter Zugriff am 10.01.19.
- [15] Microsoft: The Process Digital Twin: A step towards operational excellence, 2017 [Online: <https://info.microsoft.com/rs/157-GQE-382/images/Digital%20Twin%20Vision.pdf>], letzter Zugriff am 14.12.18.
- [16] Governor, J.: IBM Watson IoT and the digital twin. Industry 4.0. [Online: <https://redmonk.com/jgovernor/2017/02/24/ibm-watson-iot-and-the-digital-twin-industry-4-0/>]
- [17] Schmarzo, B.: Me, Myself and Digital Twins. [Online: https://infocus.dellemc.com/william_schmarzo/me-myself-and-digital-twins/], letzter Zugriff am 10.01.19.
- [18] SAP: Demystifying the Digital Twin: Digital Twin Whitepaper. [Online: <https://www.sapstore.com/medias/Digital-Twin-Demystified.pdf?context=bWFzdGVyfHJlc291cmNlc3wzNjAwMDB8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfHJlc291cmNlcy9oMzkvaDliLzgzOTIzNzMyNzA1NTgucGRmfD-NiZWQzZDYxMzc0NjdkYWRiNDZmNWQ5MTRiM-WJkZDIhZjEwM2E0ZDBhZDQ2YzBjYTFmYTM3ZWlwYzRjMGM0ZjU>], letzter Zugriff am 10.01.19.
- [19] Canedo, A.: Industrial IoT lifecycle via digital twins, International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS), Pittsburgh, 2016, S. 1.
- [20] Schroeder, G. N. et al.: Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange, IFAC-PapersOnLine, 49 (2016) 30, S. 12–17.
- [21] Lewis, K.: Digital Twin with Watson IoT. [Online: <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/digital-twin-watson-iot/>], letzter Zugriff am 10.01.19.
- [22] Parris, C. et al.: The future for industrial services: The digital twin. [Online: <https://www.infosys.com/insights/services-being-digital/Documents/future-industrial-digital.pdf>], letzter Zugriff am 16.01.19.
- [23] General Electric: The Digital Twin: Compressing time-to-value for digital industrial companies, 2018. [Online: https://www.ge.com/digital/sites/default/files/download_assets/The-Digital-Twin_Compressing-Time-to-Value-for-Digital-Industrial-Companies.pdf], letzter Zugriff am 10.01.19.
- [24] Abramovici, M. et al.: Semantic data management for the development and continuous reconfiguration of smart products and systems, CIRP Annals, 65 (2016) 1, S. 185–188.

- [25] Lukens, S.: A Digital Twin Approach for Designing Cost-effective Maintenance Strategies. [Online: <https://www.ge.com/digital/blog/digital-twin-approach-designing-cost-effective-maintenance-strategies>], letzter Zugriff am 10.01.19.
- [26] Bazilevs, Y. et al.: Isogeometric Fatigue Damage Prediction in Large-Scale Composite Structures Driven by Dynamic Sensor Data, *Journal on Applied Mechanics*, 82 (2015) 9, S. 91008.
- [27] Majumdar, P. K. et al.: Multi-physics Response of Structural Composites and Framework for Modeling Using Material Geometry, 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Boston, 2013, S. 2585.
- [28] Plattform Industrie4.0, Glossar: Digital Twin. [Online: https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/EN/Service/Glossary/Functions/glossar.html?cms_lv2=567016] letzter Zugriff am 21.12.18.
- [29] Boschert S. et al.: Digital Twin—The Simulation Aspect, *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*, Springer International Publishing, 2016, S. 59–74.
- [30] Gerbert, P. et al.: Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries, Boston Consulting Group, 2015. [Online: [https://www.zvw.de/media.media.72e472fb-1698-4a15-8858-344351c8902f.original.pdf](https://www.zvw.de/media/media.72e472fb-1698-4a15-8858-344351c8902f.original.pdf)], letzter Zugriff am 21.12.18.
- [31] General Electric: GE Digital Twin: Analytic Engine for the Digital Power Plant, 2016. [Online: https://www.ge.com/digital/sites/default/files/download_assets/Digital-Twin-for-the-digital-power-plant-.pdf], letzter Zugriff am 21.12.18.
- [32] Jung, T. et al.: Synchronization of a “Plug-and-Simulate”-capable Co-Simulation of Internet-of-Things-Components, *Proceedings ICME*, Gulf of Naples, 2018.
- [33] Lee, J. et al.: A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems,” *Manufacturing Letters*, 3 (2015), S. 18–23.
- [34] Cardin, O.: Classification of cyber-physical production systems applications: Proposition of an analysis framework, *Computers in Industry*, 104 (2019), S. 11–21.
- [35] Alam, K. M. et al.: C2PS: A Digital Twin Architecture Reference Model for the Cloud-Based Cyber-Physical Systems, *IEEE Access*, 5 (2017), S. 2050–2062.
- [36] Boschert, S. et al.: NEXT GENERATION DIGITAL TWIN, *Proceedings TMCE*, Las Palmas de Gran Canaria, 2018, S. 209–217.
- [37] Diesner, M. et al.: VDI Statusreport Industrie 4.0: Begriffe / Terms, VDI/VDE-GMA FA 7.21, Berlin, 2017. [Online: https://m.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gma_dateien/7153_PUB_GMA_-_Industrie_4.0_Begriffe-Terms_-_VDI-Status-report_Internet.pdf], letzter Zugriff am 14.12.18.

- [38] Talkhestani, B. A. et al.: Synchronisierung von digitalen Modellen, *atp*, 59 (2017) 07-08, S. 62.
- [39] Talkhestani, B. A. et al.: Consistency check to synchronize the Digital Twin of manufacturing automation based on anchor points, *Procedia CIRP*, 72 (2018), S. 159–164.
- [40] Laudon, K. C.: *Management information systems: Managing the digital firm*, Prentice Hall, 2015.