

## **Der Digitale Zwilling als echtzeitnahes Fertigungsabbild**

### ***Digital Twin-based real time representation of production facilities***

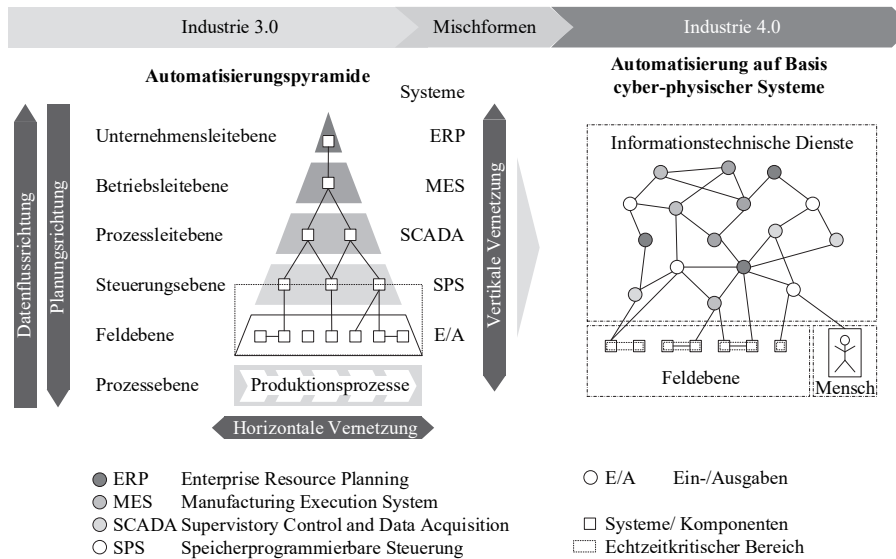
Andreas Selmaier, Martin Sjarov, Meike Herbert, Jörg Franke, Lehrstuhl für  
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik/ FAU Erlangen-Nürnberg,  
Erlangen (Germany), andreas.selmaier@faps.fau.de, martin.sjarov@faps.fau.de,  
meike.herbert@faps.fau.de, joerg.franke@faps.fau.de

Johannes Distler, Jens Fürst, Technology Center for Power and Vacuum  
Components/ Siemens Healthcare GmbH, Erlangen (Germany),  
johannes.distler@siemens-healthineers.com, jens.fuerst@siemens-healthineers.com

**Abstract:** In the course of the fourth industrial revolution, numerous digital applications are being introduced along the entire life cycle of production systems. The structures of the classic automation pyramid are being softened and replaced by hybrid and decentralized structures in order to allow data and information to flow flexibly directly to where they are needed. For decision making processes in the manufacturing environment, a comprehensive overview of the factory and its current state is crucial. For this, specialised solutions are required to provide an intuitive access to the digital factory. The digital representation including enrichment with actual data falls under the paradigm "Digital Twin", which can be systematized by means of the Digital Twin Structure Model. In this context, the article discusses a corresponding solution as a "proof-of-concept". The underlying concept as well as a real-world application are presented accordingly. Furthermore, the added value and future potentials are laid out.

## **1 Einführung**

Ein gebräuchliches Konzept zur Strukturierung der Automatisierungsarchitektur von Produktionssystemen ist die Automatisierungspyramide, welche die Teilsysteme gekoppelt, jedoch mit einer hierarchischen Verantwortlichkeitstrennung darstellt. Die starren Grenzen dieses hierarchischen Konzepts gehen mit Limitationen hinsichtlich der Flexibilität und Erweiterbarkeit einher. Im Zuge der aktuellen Digitalisierung im Rahmen von Industrie 4.0 werden daher unter Verwendung neuer Informations- und Kommunikationstechnologien die Grenzen der Automatisierungspyramide zunehmend aufgelöst, indem dezentrale Systeme Daten über die Grenzen zuvor getrennter Ebenen hinweg austauschen (vgl. Abb. 1) (Bettenhausen und Kowalewski, 2013).



**Abbildung 1:** Auflösung starrer Strukturen der Automatisierungspyramide durch dezentrale und verteilte Dienste, i.A.a. (Fleischmann, 2019)

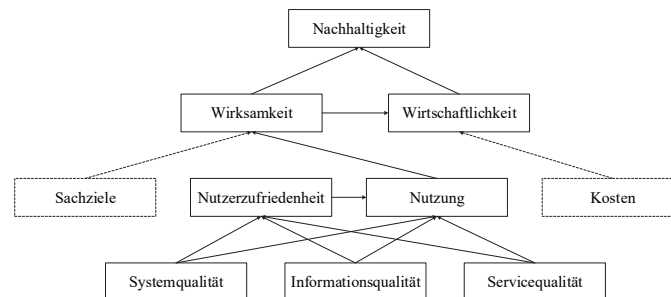
Dieser Vorgang, der auch als vertikale Integration bezeichnet wird, bietet Vorteile hinsichtlich der Erweiterbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. Während die Digitalisierung auf der einen Seite als Befähiger zur Erschließung von Optimierungspotentialen dient, führt die Hinzunahme neuer Softwarelösungen auch zu einem Komplexitätsanstieg des (Plattform I4.0). Die Realisierung eines Informationssystems (IS), welches diese Komplexität mittels eines echtzeit-nahen Abbilds der gesamten Fabrik in übersichtlicher Weise begreifbar macht und Inhalt des folgenden Beitrags ist, bringt auf strategischer, taktischer und operativer Ebene erhebliche Mehrwerte mit sich. Auf strategischer Ebene schaffen Leistungskennzahlen Transparenz und ermöglichen durch einen entsprechenden Drilldown Ursachen und Wirkzusammenhänge zu erkennen (Klein, 2015). Auf taktischer und operativer Ebene stellen Auftragsstatus sowie aktuelle Prozess- und Anlagenzustände wichtige Echtzeitinformationen da, und sind ferner eine Voraussetzung für betriebsbegleitende Simulationsaufgaben (Selmaier et al., 2019). Das Verknüpfen von Anlagen- und Prozessdokumentationen sowie Arbeits- und Wartungsplänen erhöht die funktionsübergreifende Zugänglichkeit und Transparenz. Durch die Nutzung aktueller 3D-Visualisierungsmöglichkeiten ermöglicht das vorgestellte IS einem breiten Anwenderkreis den Zugang zur digitalen Fabrik und erleichtert die Verortung von Informationen der realen Welt.

## 2 Stand der Technik und Forschung

### 2.1 Informationssysteme im Kontext I4.0

IS sind soziotechnische Systeme, die der Erfassung, Verarbeitung und Bereitstellung von Information und Kommunikation dienen. Sie werden zur Erreichung von Sachzielen unter der Einhaltung von Formalzielen eingesetzt (Eller und Riedl, 2016).

Auf Basis einer Studie fassen (Eller und Riedl, 2016) die strategischen Formalziele von IS sowie deren Beziehungen untereinander in einem Zielsystem zusammen, welches Abbildung 2 zeigt.



**Abbildung 2:** Zielsystem strategischer Formalziele von Informationssystemen i.A.a. (Eller und Riedl, 2016)

Dieses Zielsystem beschreibt Nachhaltigkeit als höchstes Ziel, welches durch die Wirksamkeit sowie die Wirtschaftlichkeit bedingt wird. Die Wirksamkeit wird wiederum beeinflusst durch den Erfüllungsgrad der Sachziele (vgl. Tab. 1) sowie die Nutzung. An dieser Stelle sei insbesondere das Formalziel der Systemqualität hervorgehoben, welches wiederum eine Vielzahl an Teilzielen wie Fehlerfreiheit, Sicherheit, Wartbarkeit, Flexibilität, Durchdringung, Zuverlässigkeit sowie die Benutzbarkeit beinhaltet (Eller und Riedl, 2016).

Ergänzend zu den Formalzielen, welche erfolgsentscheidende Kriterien für den Einsatz und Betrieb des IS darstellen, beschreiben Sachziele die zu realisierende Aufgabe in Abhängigkeit des Einsatzgebietes. Im Gegensatz zu Systemen, die der Komplexitätsreduktion dienen, werden IS zur Verbesserung der Beherrschbarkeit von komplexen Systemen (hier: Produktionssystemen) eingesetzt (Schoeneberg, 2014). Im Produktionskontext kommen so eine Vielfalt an klassischen IS (Industrie 3.0) zum Einsatz, deren Vielfalt im Zuge von Industrie 4.0 durch dezentrale Vernetzungsmöglichkeiten noch einmal erweitert wird. Diese IS lassen sich nach ihrer Aufgabenart wie in Tabelle 1 dargestellt kategorisieren. Zusammenfassend geht hervor, dass IS zur Steigerung der Prozessqualität und -effizienz von administrativen, dispositiven, planenden und ausführenden Tätigkeiten eingesetzt werden. Bei der Umsetzung moderner IS wird dabei bereits in Teilen das Entwicklungsparadigma des Digitalen Zwillings angewandt, vgl. (Lee et al., 2020; Fleischmann, 2019; Donhauser, 2020).

## 2.2 Digitaler Zwilling

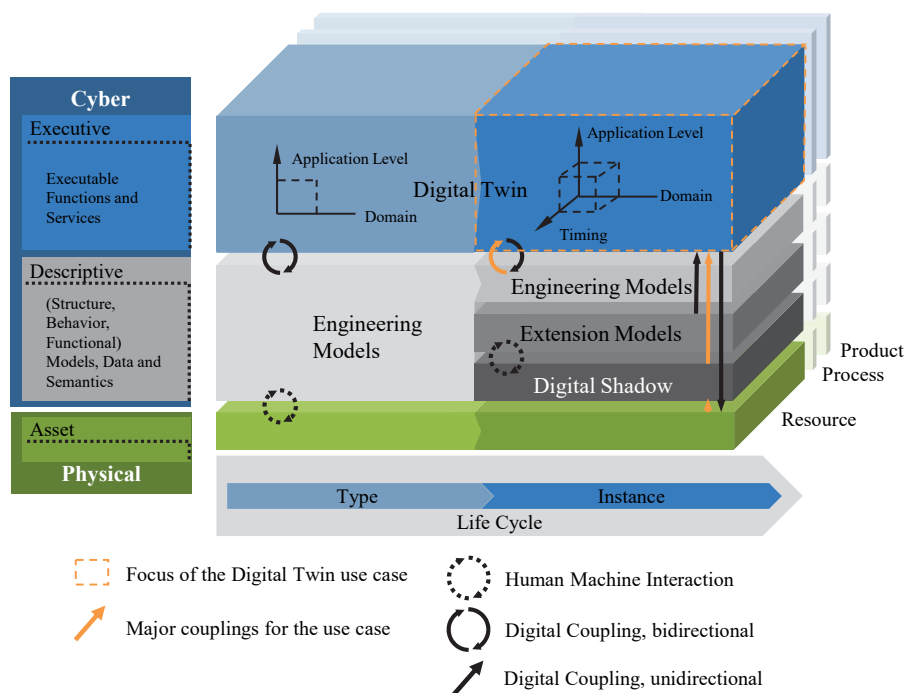
Der „Digitale Zwilling“ ist als Schlagwort und aufkommendes Paradigma in den letzten Jahren verstärkt in den Fokus wissenschaftlicher Veröffentlichungen gerückt. Das Fazit eines diesbezüglichen Reviews ist, dass verschiedene, teils widersprüchliche Auffassungen und Definitionen zum Wesen des Digitalen Zwillings existieren, jedoch bestimmte wiederkehrende Muster identifizierbar sind (Sjarov et al., 2020). Um dem zu begegnen, wurde das Digital Twin Structure Model (DTSM) als Metamodell zusammen mit einer Definition des Digitalen Zwillings erarbeitet, welches in modifizierter Form in Abbildung 3 dargestellt ist (Lechler et al., 2020):

Der Digitale Zwilling ist hier der Definition nach der Teil des gleichnamigen Paradigmas, in welchem zu einem physischen Asset gehörende, digital erfasste Daten zusammen mit den digitalen Engineering-Modellen genutzt werden, um verschiedene Funktionen und Services bereitzustellen. Das DTSM gliedert zunächst den Lösungsraum entlang einer Lebenszyklus-Achse in „Typ“ und „Instanz“, wobei erstere der Entwurfs- und Engineering-Phase entspricht und letztere der tatsächlichen Fertigung und anschließenden Nutzung. In der Vertikalen wird zwischen der physischen Ebene unterschieden, in der das entsprechende Asset lokalisiert ist, sowie der Cyber-Ebene, welche alle digitalen Daten, Modelle und Funktionen enthält.

**Tabelle 1:** Gruppierung von Informationssystemen im Produktionskontext nach Aufgabenart

Aufgabenart	Informations- und IT-Systeme	Weiterführende Literatur
Wissensmanagement	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Wiki</li> <li>■ Intranet / Unternehmensinterne soziale Netzwerke</li> <li>■ Ontologiebasierte Wissensmanagement-Systeme*</li> </ul>	(Brandmeier, 2019)
Informationsbereitstellung	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ PDM-Systeme</li> <li>■ Business Intelligence- / Analytics-Umgebungen*</li> </ul>	(Sand, 2021)
Ausführungsaufgaben	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Manufacturing Execution Systems (MES)</li> <li>■ Intralogistics Execution Systems (IES)*</li> <li>■ Warehouse-Management-Systeme (WMS)</li> <li>■ Ein- / Verkaufssysteme</li> <li>■ Digitale Plantafeln / Shopfloorboards*</li> <li>■ RPA-Plattformen*</li> <li>■ Low-Code-Apps*</li> </ul>	(Scholz, 2019)  (Meißner et al., 2018) (Langmann, 2021)
Planungs- und Steuerungssysteme	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ERP-Systeme</li> <li>■ Dispositionssysteme</li> <li>■ Simulationsgestützte Auftragsregelung*</li> <li>■ Predictive-Maintenance-Systeme*</li> </ul>	(Donhauser, 2020)** (Lee et al., 2020)**
Kontrollsysteme	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Leitstände</li> <li>■ SCADA-Systeme</li> <li>■ Condition-Monitoring-Systeme*</li> <li>■ Energieüberwachungs-Systeme*</li> </ul>	(Fleischmann, 2019)** (Rackow, 2016)

\* Neue Anwendungen durch I4.0; \*\* Einsatz von Digitalen Zwillingen



**Abbildung 3:** Einordnung des digitalen Fertigungsabbildes in das Digital Twin Structure Model (DTSM) i.A.a. (Lechler et al., 2020)

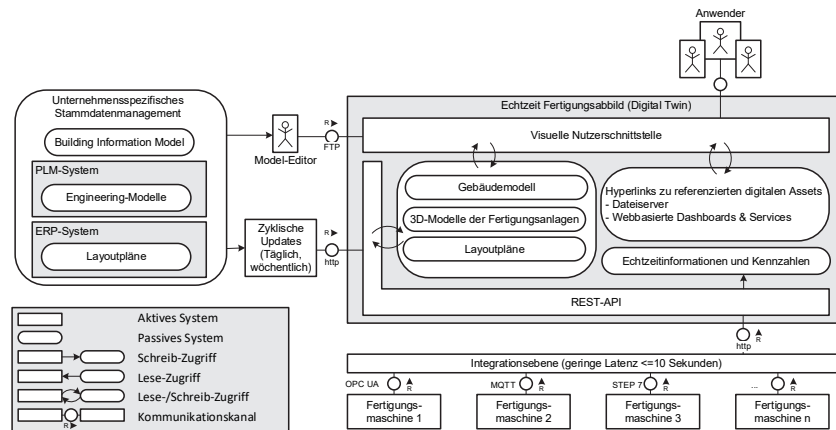
In der dritten Dimension wird zwischen den wesentlichen Artefakten „Produkt, Prozess und Ressource“ unterschieden, um eine weitere Granularität im Kontext der industriellen Anwendung bereitzustellen. Um nun Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings unterscheiden zu können, sind diesem die Dimensionen Anwendungslevel, Domäne sowie Timing zugeordnet. Auch berücksichtigt das Modell etwaige Informationsflüsse auf konzeptioneller Ebene, ohne jedoch konkrete Technologie-Ausprägungen vorzuschreiben.

### 2.3 Zwischenfazit

Während IS auf der einen Seite die Beherrschbarkeit komplexer Systemen erleichtern, bilden sie auf der anderen Seite bereits bei mittelgroßen Unternehmen ein schwer zu überblickendes Netzwerk. Die fehlende Transparenz über den werksweiten Einsatz von IS führt zu Redundanzen und Medienbrüchen (Schoeneberg, 2014). Weiterhin erschweren mangelnde Sichtbarkeit und Zugänglichkeit von vorhandenen IS die ganzheitliche Berücksichtigung von Informationen. Somit wird der Bedarf eines IS abgeleitet, welches eine integrierende Funktion einnimmt und damit einen aktuellen Überblick über die Fertigung auf intuitive Weise gewährt. Ein solches ist der Aufgabenart „Informationsbereitstellung“ in Tabelle 1 zuzuordnen. Für die Erstellung stellt das Paradigma des Digitalen Zwillings einen vielversprechenden Ansatz dar, indem das physische Produktionssystem inklusive relevanter Informationsquellen in einem digitalen Modell abgebildet und mittels dedizierten Services unter Nutzung einer aktuellen Datenbasis den Mitarbeitern zugänglich gemacht wird.

### 3 Lösungsansatz

Die Lösung ist ein echtzeitnaher Digitaler Zwilling der Fertigung, welcher sich aus einem interaktiven, dreidimensionalen Modell sowie darin verorteter digitaler Assets und Realdaten zusammensetzt (vgl. Abb. 4). Als spezialisierte Systemlösung wird die webbasierte Software Intosite der Siemens AG eingesetzt.



**Abbildung 4:** Architektur des digitalen Echtzeitabbildes der Fertigung (Vereinfachte Darstellung)

Die Erstellung des 3D-Modells der Fertigung lässt sich sowohl automatisiert über eine REST-Schnittstelle sowie manuell durch den Upload einzelner Modelle oder halbautomatisch mittels listenbasierter Imports realisieren. Da die Stammdaten in der Praxis meist in verschiedenen Systemen und Formaten vorliegen, sind hierbei entsprechende Konvertierungsvorgänge in die von Intosite unterstützten Datenformate vorzusehen. Echtzeitinformationen, wie Alarme, Kennzahlen oder aktuelle Prozess- und Anlagenzustände werden via REST-API mit geringer Latenz im Sekundenbereich aktualisiert. Zwar ermöglicht die Software einen direkten Upload von Dokumenten, doch sind diese bevorzugt über Verlinkungen einzubinden, um eine redundante Datenhaltung und Pflege zu vermeiden. Weiterführende webbasierte Inhalte, wie Dashboards oder entsprechende Absprünge in ERP- oder PLM-Systeme mittels Hyperlinks in die Software eingebunden. Sichtbarkeiten von Fertigungsbereichen können über Rollen und Gruppen eingeschränkt werden. Während für die Aktualisierung der zugrundeliegenden Modelle ein Expertenwissen notwendig ist, können die eingebundenen Informationsquellen durch den Anwenderkreis selbst aktualisiert werden. Es entsteht ein interaktives und echtzeitnahes Fertigungsabbild, welches wie folgt durch das DTSM charakterisiert werden kann, siehe Abbildung 3 und Tabelle 2 (Lehler et al., 2020). Bei der Ausprägung des digitalen Fertigungsabbildes handelt es sich um eine Repräsentation von instanziierten Fertigungsressourcen unter Verwendung zugehöriger CAD-Engineering-Modelle. Die Applikation dient der mit Echtzeitdaten und Informationen angereicherten Visualisierung der Produktionsanlage. Die im DTSM als Digitaler Schatten bezeichneten Fertigungsdaten umfassen sowohl historische als auch echtzeitnahe Daten.

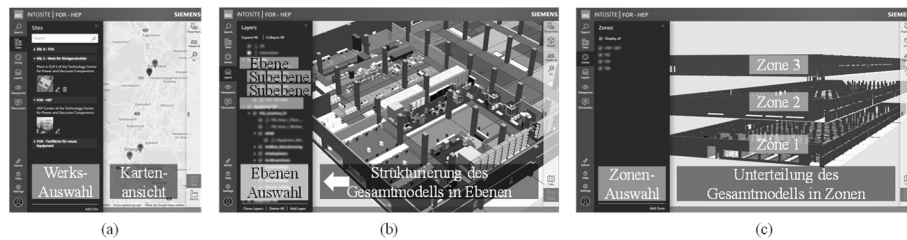
**Tabelle 2:** Kategorisierung des Anwendungsfalls im DTSM

Anwendungsfall	PPR			Lebenszyklus		Anwendungs-Level				Zeitverhalten			Domäne				
	Produkt	Prozess	Ressource	Typ	Instanz	Visualisierung	Identifizierung	Vorhersage	Regelung	Asynchron	Echtzeit-nah	Echtzeit	Physisch	Logistisch	Ökonomisch	Software	Andere
Intuitives Echtzeitabbild von Produktionsanlagen			●		●	●	●			●	●		●				

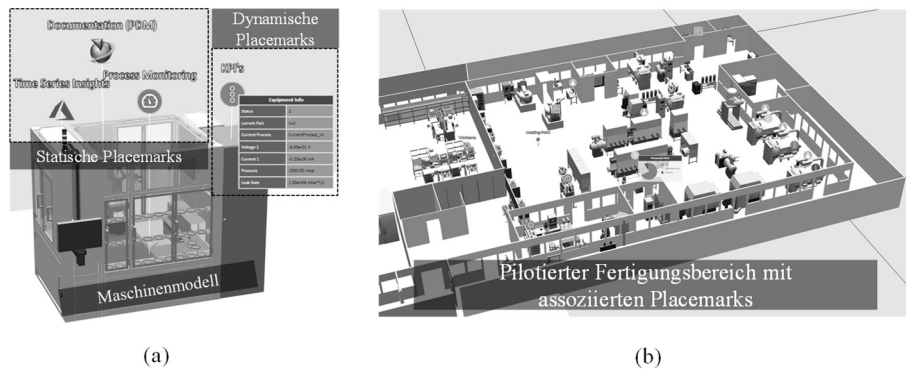
## 4 Anwendungsfall

Der ausgewählte Standort in Erlangen für Hochleistungsrontgenstrahler der Siemens Healthcare GmbH beschäftigt einige hundert Mitarbeiter mit Fertigungsbezug, welche in einer funktionalen Aufbauorganisation eingeordnet sind. Der Fertigungstyp weist überwiegend den Charakter einer Werkstattfertigung auf. Auf den rund 200 Equipments und Fertigungsstationen werden jährlich über 15.000 Röntgenstrahler für Anwendungen der Computertomographie sowie der interventionellen Radiologie gefertigt. In Hinblick auf einen anstehenden Umzug des Werks in das neu zu errichtende High-Energy and Photonics Center (HEP) in Forchheim (InFranken, 2020), werden die zukünftigen informationsverarbeitenden Prozesse des Werks bereits in der Planung mit den Werkzeugen der Digitalisierung vorbereitet. Durch die Vielzahl an parallel stattfindenden Digitalisierungsaktivitäten und die damit einhergehenden Änderungen der IT-Landschaft, besteht ein hoher Synchronisations- und Einarbeitungsaufwand. Hiervon sind operative Tätigkeiten gleichermaßen betroffen, wie strategische IT-Konsolidierungsaufgaben. Infolgedessen wurde sowohl für das bestehende Werk in Erlangen Süd als auch für das neu entstehende HEP-Center in Forchheim ein Informationssystem nach dem in Abbildung 4 illustrierten Architekturkonzept prototypisch umgesetzt. Abbildung 5 zeigt die verschiedenen Ansichten und Navigationsmöglichkeiten des digitalen Fertigungsabbildes. Die Kartenansicht von Intosite ermöglicht einen geographischen Überblick sowie Verortung von Produktionsstätten des Unternehmens. Somit eignet sich die Lösung nicht nur für den werksweiten, sondern auch unternehmensweiten Einsatz. Im vorliegenden Anwendungsfall wurden sowohl Teile der bestehenden Werke in Erlangen, eine Testfläche für neues Fertigungsequipment in Forchheim, als auch Teile des HEP-Centers in Forchheim abgebildet. Die Modelle der einzelnen Standorte bestehen aus 2D-Layoutplänen, den 3D-CAD Modellen der Gebäude und Anlagen sowie nachfolgend erläuterten Platzierungszeichen („Placemarks“). Die Teilelemente des Gesamtmodells werden bei der Modellzusammenstellung in Hierarchie-Ebenen strukturiert, welche sich durch entsprechende An- und Abwahl ein- bzw. ausblenden lassen. Eine weitere Navigationsmöglichkeit stellen Zonen dar, welche eine zusätzliche Gruppierungslogik für zusammengehörige Fertigungsbereiche und Placemarks darstellen. In Abbildung 5c werden Zonen eingesetzt, um beispielsweise ganze Stockwerke ein- bzw. ausblenden zu können. Da die Modellstruktur eine

wesentliche Grundlage für die Bedienbarkeit des IS darstellt, wurde auf eine einheitliche Gestaltungslogik wert gelegt. Die Modellerstellung erfordert spezifisches Fachwissen und wird nach dem Anwenderkonzept in Abbildung 4 von vorgesehenen Modell-Editoren erstellt und bei Änderungen aktualisiert. Hingegen wird bei der Integration von Informationsquellen und -systemen mittels Placemarks ein Ansatz zur Pflege und Aktualisierung durch die Anwender selbst angestrebt.



**Abbildung 5:** Ansichten und Navigationsmöglichkeiten des 3D-Fertigungsabbildes; (a) Kartenansicht mit Werksübersicht, (b) Strukturierung des Gesamtmodells in Hierarchie-Ebenen, (c) Zonenauswahl als Navigationshilfe und Visualisierung zusammengehöriger Modellbestandteile



**Abbildung 6:** Detailansicht einer Maschine mit statischen und dynamischen Placemarks (a) sowie Momentaufnahme eines abgebildeten Fertigungsbereichs (b)

Innerhalb des Modells lassen sich durch die Anwender statische und dynamische Informationselemente mittels Placemarks platzieren. In statischen Placemarks können Verlinkungen zu anderen Informationssystemen, Adressinformationen oder auch Panoramaaufnahmen hinterlegt werden (vgl. Abb. 6a). Echtzeitnahe Informationen lassen sich in dynamischen Placemarks in das Modell integrieren und über eine REST-API automatisiert aktualisieren. Für die Darstellung der dynamischen Placemarks bietet Intosite drei verschiedene Optionen: Die Ampeldarstellung eignet sich für die Visualisierung von Anlagen- oder Prozesszuständen; das Kreisdiagramm zur Darstellung von prozentualen Verteilungen, wie Gut-, Nacharbeits-, und Ausschussmengen; in der Tabellenform lassen sich Kennzahlen und aktuelle Prozesswerte oder Auftrags-IDs abbilden. Die Verknüpfung von Informationselementen mit dem



Anlagenmodell (vgl. Abb. 6a) lässt sich analog auf einen gesamten Fertigungsbereich (vgl. Abb. 6b) übertragen. Da in der Praxis, wie auch im hier vorliegenden Anwendungsfall, die IT-Landschaft einer Fertigung stetigen Veränderungen unterliegt, ist eine fortlaufende Pflege und Aktualisierung des Modells notwendig. Während es für einen einzelnen Mitarbeiter eine mühsame Aufgabe darstellt, den aktuellen Zustand einer Fertigung zu erfassen und abzubilden, lässt sich das verteilte Detailwissen mittels eines anwenderzentrierten Ansatzes nahezu aufwandsneutral zusammentragen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Das in diesem Beitrag vorgestellte Fallbeispiel zeigt, wie mit verfügbaren Tools ein dreidimensionales Fertigungsabbild realisiert werden kann, welches den aktuellen Ist-Zustand der realen Fertigung widerspiegelt. Das theoretisch stark diskutierte Paradigma des Digitalen Zwillings wird damit zunehmend operationalisiert. Die Verwendung eines dreidimensionalen Modells, welches Informationselemente in ihrem Kontext erscheinen lässt, ermöglicht eine intuitive Bedienung und erhöht zudem die Einprägsamkeit beim Wissenstransfer. Die durch das realgetreue Abbild entstehenden Mehrwerte sind insbesondere auf die gesteigerte Transparenz und Übersicht zurückzuführen. Dies ist sowohl für die Einarbeitung neuer Mitarbeiter, als auch für Konsolidierungs- und Entscheidungsprozesse in komplexen Systemen vorteilig. Mittels asynchronen Informationsaustausches erhalten Mitarbeiter die Möglichkeit über ihre Funktionsbereiche und -tools hinaus Zusammenhänge zu erkennen und Synergien zu nutzen. Weiterhin kann mit den Visualisierungsmöglichkeiten im Modell die Sichtbarkeit erfolgreicher Digitalisierungsansätze erhöht werden. Das Optimierungspotential der Lösung besteht in einer weiteren Automatisierung zur Synchronisation von Realität und digitalem Abbild sowie der Überführung des Systems von einem „Proof of Concept“-Status hin zu produktivem Einsatz auf Werks- und Unternehmensebene.

## Danksagung

Die Ergebnisse wurden im Rahmen einer Forschungskooperation zwischen der Siemens Healthcare GmbH und dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) erarbeitet. Die Autoren möchten sich bei den beteiligten Mitarbeitern des Technology Centers for Power and Vacuum Components für die sehr gute Zusammenarbeit bedanken.

## Literatur

- Bettenhausen, K., Kowalewski, S.: Cyber-Physical Systems. Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. VDI (2013).
- Brandmeier, M.: Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion 2019.
- Donhauser, T.: Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation, FAU University Press, Doctoralthesis, 2020.

- Eller, C.; Riedl, R.: Ziele von Informationssystemen. HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik 53 (2016) 2, S. 224–238.
- Fleischmann, H.: Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme, FAU University Press, Doctoralthesis, 2019.
- InFranken, 2020: Siemens Healthineers baut 24 Meter hohes Technologiecenter in Forchheim. inFranken.de, Dezember 2020. Online verfügbar unter <https://www.infranken.de/lk/forchheim/siemens-baut-24-meter-hohes-technologiecenter-in-forchheim-art-5136063>, zuletzt geprüft am 11.05.2021.
- Klein, A.: Unternehmenssteuerung mit Kennzahlen: Inkl. Arbeitshilfen online ; Auswahl, Ermittlung, Analyse, Kommunikation. s.l.: Haufe Verlag 2015.
- Langmann, C.: Robotic Process Automation (RPA) - Study on Characteristics of Successful RPA Implementations, 2021,
- Lechler, T.; Fuchs, J.; Sjarov, M.; Brossog, M.; Selmaier, A.; Faltus, F.; Donhauser, T.; Franke, J.: Introduction of a comprehensive Structure Model for the Digital Twin in Manufacturing. In: 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vienna, Austria, 08.09.2020 - 11.09.2020, 2020, S. 1773–1780.
- Lee, J.; Ni, J.; Singh, J.; Jiang, B.; Azamfar, M.; Feng, J.: Intelligent Maintenance Systems and Predictive Manufacturing. Journal of Manufacturing Science and Engineering 142 (2020) 11.
- Meißner, A.; Hertle, C.; Metternich, J.: Digitales Shopfloor Management – Ihr Weg zur vernetzten Fabrik. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113 (2018) 5, S. 281–284.
- Plattform I4.0: Mensch und Maschine: Neue Interaktionsformen eröffnen Chancen bei der Arbeitsorganisation und verändern die Anforderungen an Beschäftigte. Online verfügbar unter <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Standardartikel/handlungsfelder-arbeit-40.html>, zuletzt geprüft am 19.02.2021.
- Rackow, T.: Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie. Bamberg: Meisenbach 2016.
- Sand, C.: Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining. Erlangen: FAU University Press 2021.
- Schoeneberg, K.-P.: Komplexitätsmanagement in Unternehmen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014.
- Scholz, M.: Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten. Erlangen: FAU University Press 2019.
- Selmaier, A.; Donhauser, T.; Lechler, T.; Zeitler, J.; Franke, J.: Simulationsgestützte Produktionsplanung flexibler Fertigungssysteme. wt Werkstattstechnik - Online wt-online 2019 (2019), Seite 240-247.
- Sjarov, M.; Lechler, T.; Fuchs, J.; Brossog, M.; Selmaier, A.; Faltus, F.; Donhauser, T.; Franke, J.: The Digital Twin Concept in Industry – A Review and Systematization. In: 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vienna, Austria, 08.09.2020 - 11.09.2020, 2020, S. 1789–1796.