

Postprint. Erstveröffentlichung: Rachner, Jonas; Hort, Simon; Schmitt, Robert H. (2020): Digitale Lösungen zur Steuerung frei verketteter Montagesysteme. Realisierung von flexiblen Routen im Kontext Industrie 4.0, in: Industrie 4.0 Management 36 (6), S. 43-47.

## **Digitale Lösungen zur Steuerung frei verketteter Montagesysteme**

*Ein Ansatz zur Realisierung von flexiblen Routen im Kontext Industrie 4.0*

Jonas Rachner, Simon Hort und Robert H. Schmitt

### **Autoren**

Jonas Rachner M.Sc. arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement am Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Hochschule (RWTH) Aachen mit dem Themenschwerpunkt Modellierung und Simulation von flexiblen Montagesystemen.

Simon Hort M.Sc. arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Produktionsqualität und -messtechnik am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT) in Aachen und beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Digitalisierung und Automatisierung von flexiblen Produktionssystemen.

Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt ist Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement am Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Hochschule (RWTH) Aachen und Mitglied im Direktorium des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie (IPT).

### **Kontakt**

Jonas Rachner  
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen  
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement  
Campus-Boulevard 30  
52074 Aachen  
Telefon: +49 241 80-26950  
E-Mail: [j.rachner@wzl.rwth-aachen.de](mailto:j.rachner@wzl.rwth-aachen.de)  
URL: <http://www.wzl.rwth-aachen.de>

Simon Hort  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT  
Steinbachstraße 17  
52074 Aachen  
Telefon: +49 241 8904-251  
E-Mail: [simon.hort@ipt.fraunhofer.de](mailto:simon.hort@ipt.fraunhofer.de)  
URL: <https://www.ipt.fraunhofer.de>

Robert H. Schmitt  
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen  
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement  
Campus-Boulevard 30  
52074 Aachen  
E-Mail: [r.schmitt@wzl-rwth-aachen.de](mailto:r.schmitt@wzl-rwth-aachen.de)  
URL: <http://www.wzl.rwth-aachen.de>

### **Einführung**

Bedingt durch erhöhte Produkt- und Variantenvielfalt wächst der Bedarf nach flexibel gestalteten Montagesystemen. Im Gegensatz zur klassischen Linienproduktion mit vorherrschend starrer Fördertechnik werden in einer frei verketteten Montage effiziente, individuelle Montagerouten mit taktunabhängigen Bearbeitungszeiten durch intelligente Steuerung und fahrerlose

Transportsysteme (FTS) realisiert. Herausforderungen bei der Implementierung sind neben der Neuordnung von Arbeitsstationen auf dem Shopfloor auch die Anpassung der bestehenden IT-Systeme und die Schaffung einer einheitlichen Datenlandschaft. Dieser Beitrag stellt die wichtigsten Faktoren zur IT-seitigen Umsetzung einer frei verketteten Montage dar und zeigt auf, welche bestehenden Standards aus dem Bereich Industrie 4.0 hierfür eingesetzt werden können.

## Herausforderungen der frei verketteten Montage

Ein Ansatz zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit und Flexibilität in Montagesystemen ist die Umstrukturierung zur Organisationsform der frei verketteten Montage, in der durch die Auflösung zeitlicher und räumlicher Restriktionen individuelle Bearbeitungsreihenfolgen mit taktunabhängigen Bearbeitungszeiten ermöglicht werden. Kernaspekte sind eine intelligente, vernetzte Planung und Steuerung, rekonfigurierbare Arbeitsstationen und ein flexibler Produkt- und Materialtransport z.B. durch die Nutzung von FTS (siehe Abbildung 1) [1]. Anders als bei der klassischen Linienmontage ist die Montageroute nicht fest vorgegeben und kann vorab oder auch im laufenden Betrieb angepasst werden. Simulationsstudien aus der Automobilproduktion ergaben, dass eine flexible, matrixorientierte Montage gegenüber der klassischen Linienmontage eine Steigerung der Werkerauslastung um bis zu 12 % ermöglicht [2]. Zudem können auftretende Störungen durch die Echtzeitsteuerung und das damit verbundene, direkte Ausweichen auf redundante Stationen kompensiert und die Resilienz der Montagesysteme signifikant erhöht werden [3].

Ein wichtiger Faktor zur Umsetzung individueller Bearbeitungsrouen ist die ganzheitliche Einbindung digitaler Lösungen zur Planung und Steuerung. Im Folgenden werden die wichtigsten Bestandteile zur digitalen Integration anhand von Leitfragen dargestellt (siehe Abbildung 2) und mit bestehenden Standards aus dem Bereich Industrie 4.0 verknüpft.

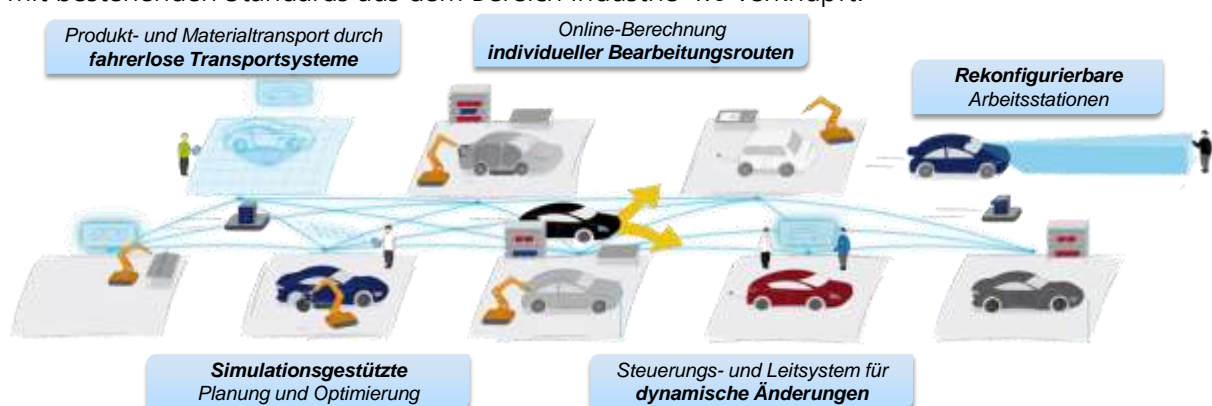


Bild 1: Faktoren zur Umsetzung einer digitalisierten, frei verketteten Montage am Beispiel der automobilen Endmontage

## Wichtige Bestandteile der digitalen Integration

Für eine erfolgreiche Systemsteuerung müssen ausreichend Informationen gesammelt und die richtigen Schlüsse daraus gezogen werden. Für die frei verkettete Montage heißt das, dass alle erfassten Daten der Objekte auf dem Shopfloor, sogenannte Assets, wie z.B. Montagestationen, Produkte oder FTS den Planungs- und Steuerungssystemen zur Verfügung gestellt werden müssen. Dies geschieht über einen **Digitalen Zwilling**, also ein Informationsmodell, das jedes Asset digital repräsentiert, dessen Daten bereitstellt und so deren Vernetzung ermöglicht. Die Weiterverarbeitung und Verwendung dieser Daten erfolgt in verschiedenen Softwaresystemen, die gemeinsam mit den Assets in einer **Systemarchitektur** dargestellt werden. Diese zeigt die Aufgaben und funktionalen Zusammenhänge der einzelnen Komponenten auf. Für eine

verlässliche Interaktion der Komponenten müssen geeignete **Schnittstellen** definiert und **Kommunikationsprotokolle** bestimmt werden.

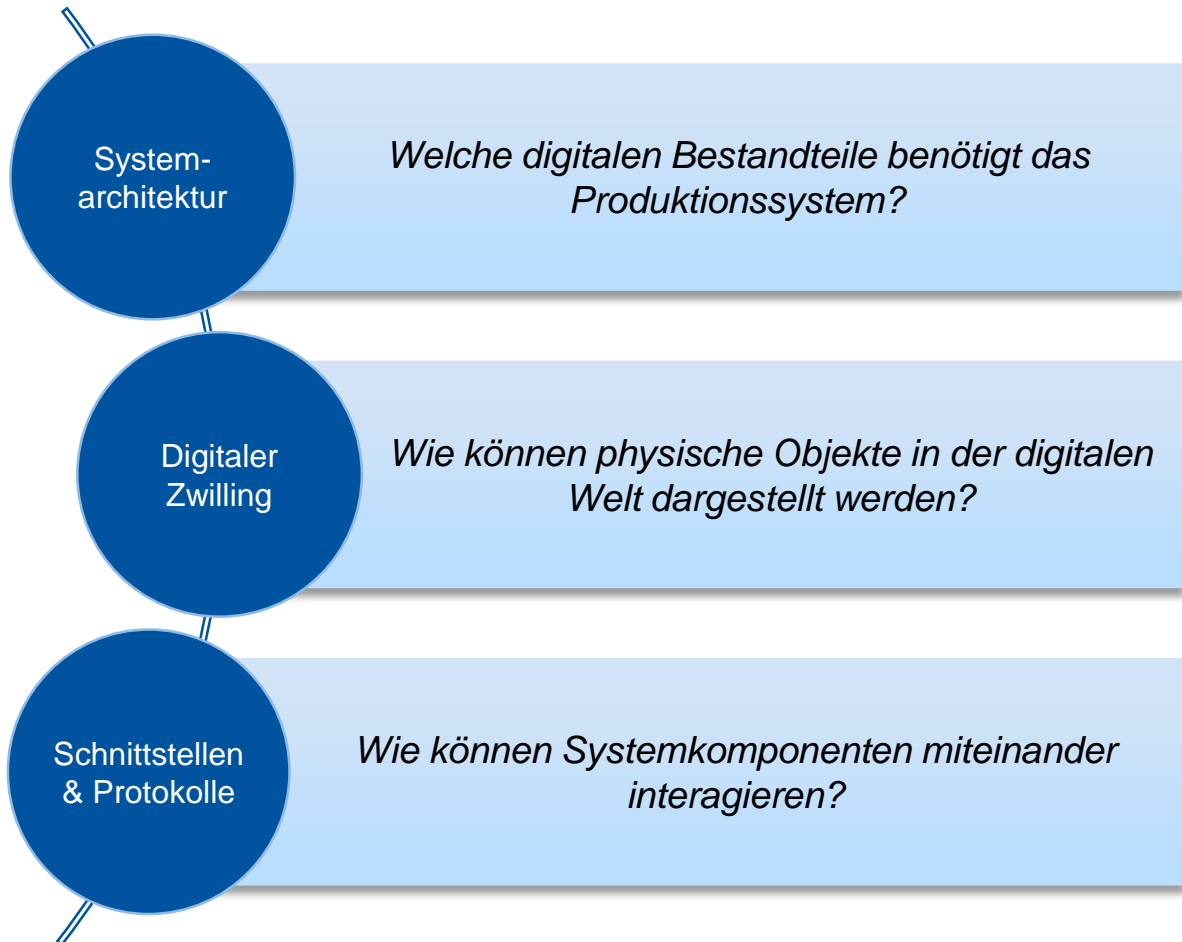


Bild 2: Bestandteile und Leitfragen zur digitalen Integration

### **Aufbau der Systemarchitektur**

Waren es in der Vergangenheit ganzheitliche proprietäre Lösungen, mit denen eine starr verkettete Linienmontage verwaltet und gesteuert werden konnte, besteht heute der Bedarf an flexiblen Steuerungs- und Datenverarbeitungssystemen. Dies wird bedingt durch die individuelle Steuerung einer Vielzahl an Robotern und FTS auf dem Shopfloor und einer hohen Menge an aufgenommenen Daten. Durch eine modular aufgebaute Systemarchitektur können Produktionsdaten aufwandsarm eingepflegt und bereitgestellt werden sowie Systemkomponenten effizient miteinander interagieren. Diese Komponenten sind in Abbildung 4 dargestellt und anhand der Ebenen der klassischen Automatisierungspyramide eingeordnet [4].

Im Zentrum steht das **Leitsystem** zur Steuerung der Material- und Produktflüsse. Es ist sowohl für die Erstellung eines optimalen Ablaufplans als auch für die Freigabe und Ausführung der einzelnen Auftragsschritte verantwortlich. Für eine dynamische Reaktion auf Abweichungen des Ablaufplans (z.B. durch Stationsausfälle oder kurzfristige Produktionsabweichungen) wird der Systemstatus jederzeit beobachtet und gegebenenfalls eine direkte Umsteuerung eingeleitet. Die Routenerstellung im Leitsystem erfolgt über den Abgleich von auszuführenden Arbeitsschritten mit den verfügbaren Fähigkeiten der Montagestationen. Dazu werden in einem ersten Schritt alle verfügbaren Routen erstellt (Matching) und dann anhand eines Zielkriteriums (z.B. Durchlaufzeit,

Maschinenauslastung oder Termintreue) die optimale ausgewählt (Routing) [5]. Die Berechnungen können dabei von einfachen heuristischen Lösungen (z.B. Reihenfolgenregeln) bis hin zu Algorithmen des maschinellen Lernens reichen [3]. Die Auswahl eines geeigneten Entscheidungsalgorithmus ist eine Herausforderung, die unter Berücksichtigung aller Produktionsdaten ein großes Optimierungspotenzial bietet. Zusätzlich muss bei der Routenerstellung definiert werden in welchem Intervall oder bei welchem Ereignis (z.B. Auftragsankunft, Maschinenausfall) der Ablaufplan neu berechnet werden soll (Rescheduling). Der entstehende Ablaufplan gibt an, wann welche Arbeitsschritte eines Produktes auf welchen Stationen ausgeführt werden. Auf Basis dieser Informationen werden die entsprechenden Stationen belegt, Werker eingeplant und Handlungsanweisungen zur Verfügung gestellt.

Die benötigten Informationen zum Produktionsprogramm, Ressourcenkapazitäten, Produkt- und Auftragsdaten erhält das Leitsystem von den übergeordneten **Business-IT-Systemen**, wie z.B. ERP (Enterprise-Resource-Planning) oder PLM (Product-Lifecycle-Management). Das **Montageplanungssystem** legt die Montage optimal aus, indem es auf Basis von Modellierungen und Simulationen mögliche Montageszenarien abbildet. Dazu gehören die Ermittlung eines optimalen Layouts, digitale Versuchsmodelle zum Produktionsanlauf (*digital mock-up*), Ableitung von Montagevorranggraphen und Auftragsgrobplanungen. Letzteres dient dem Leitsystem als Grundlage für die Feinplanung, in der ein Ablaufplan (Schedule) mit den optimalen Routen erstellt wird. Dabei werden die aktuellen Randbedingungen auf dem Shopfloor berücksichtigt, wie etwa die zu montierenden Produkte, funktionsfähige Stationen und vorhandene Materialien. Um kontinuierliche Optimierungen zu ermöglichen, müssen aktuelle Produktionsdaten jederzeit in das Planungsprogramm zurückfließen und neu bewertet werden. So können beispielsweise im laufenden Betrieb Potentialanalysen über Layout- oder Programmanpassungen durch Simulation betrieben werden. Das **Informationssystem** verwaltet die auf dem Shopfloor erfassten Daten und bietet eine Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Werkerassistenz und Prozessüberwachung. Bei dem Informationssystem handelt es sich weniger um eine zentrale Datenverwaltung, als vielmehr um einen Zusammenschluss verschiedener dezentraler Speicher- und Integrationslösungen.

Für den Transport der Produkte und Materialien von einer Bearbeitungsstation zur nächsten ist der **Flottenmanager** zuständig. Dieser weist den einzelnen Transportaufträgen, die sich aus dem Schedule ergeben, entsprechende Transportfahrzeuge zu, ermittelt die schnellsten Transportwege und kontrolliert den Verkehr. Dies betrifft sowohl den Material- als auch Produktfluss, da beides auf flexibler Transportlogistik transportiert wird.

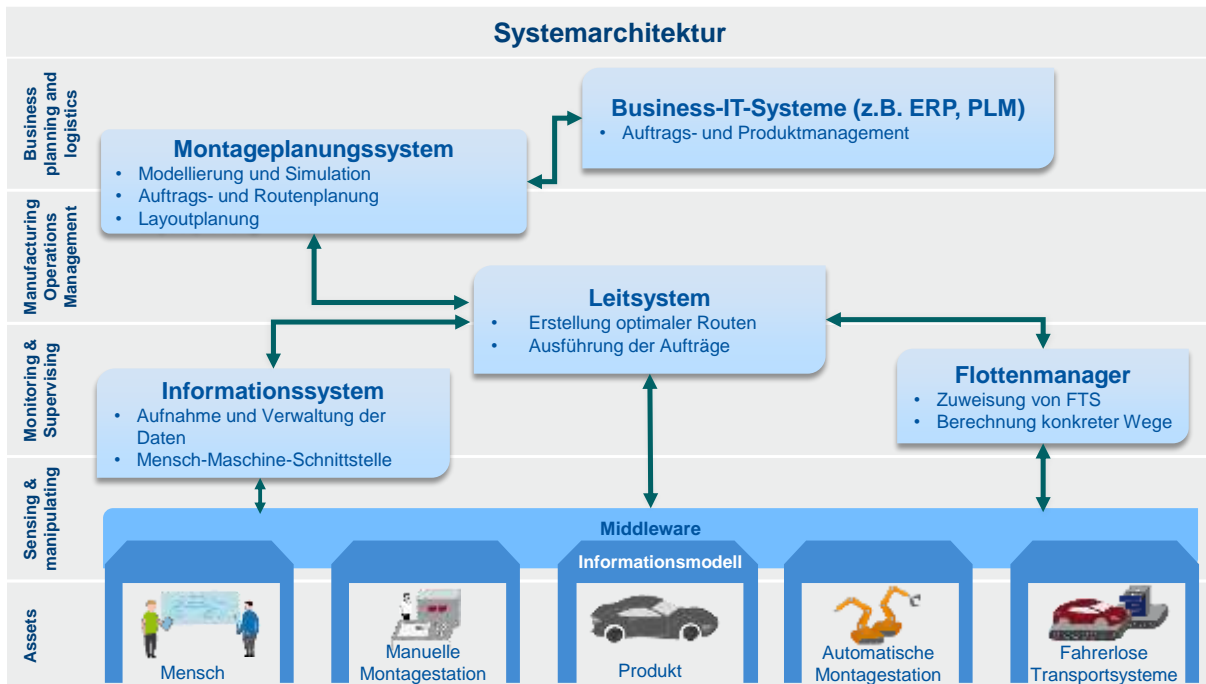


Bild 3: Systemarchitektur für ein frei verkettetes Montagesystem

## Integration des digitalen Zwillings

Nur durch eine durchgängige Datenintegration kann eine verlässliche Steuerung der frei verketteten Montage realisiert werden. Zur optimalen Systemausrichtung und Berechnung der Routen müssen alle Daten des Shopfloor (Sensordaten, Positionsdaten, Status, ...) über den gesamten Lebenszyklus erfasst und einheitlich beschrieben werden. Dafür muss das gesamte System modelliert und in einem Informationsmodell gespeichert werden. Einen konkreten Ansatz für den betrieblichen Einsatz eines Informationsmodells beziehungsweise des digitalen Zwillings wird durch die Industrie 4.0-Komponente beschrieben, die mit jedem Asset eine sogenannte Verwaltungsschale verknüpft, in der sämtliche Daten über den gesamten Lebenszyklus in einer einheitlichen, standardisierten Datenstruktur beschrieben werden [6]. Zur Sicherung der Interoperabilität und Minimierung des Modellierungsaufwandes ist bei der Beschreibung von Produkt, Prozess und Ressourcen die Verwendung branchenübergreifender Standards unabdingbar. Ein Beispiel ist der Standard eCl@ss, in dem Produkte und Dienstleistung unter Berücksichtigung diverser Normen eindeutig beschrieben werden [7]. Nach einmaliger Modellierung der Komponenten ist eine weitere Integration unternehmens- oder standortübergreifend ohne großen Aufwand möglich.

Um alle Daten in ein Informationsmodell zu aggregieren, ist eine Middleware notwendig, die alle Asset-Daten über deren hardwareseitige Schnittstellen aufnimmt und an die relevanten Systeme weiterleitet.

Weiterhin muss der Speicherort der Informationsmodelle betrachtet werden [8]. Dabei können die Daten an der Edge, also dezentral auf dem Shopfloor am Rande des Netzwerks, oder zentral in der Cloud gespeichert werden. Ist das physische Gerät darauf ausgelegt, kann das Informationsmodell auch direkt auf diesem implementiert werden. Die direkte Integration ermöglicht eine größere Rechenleistung, birgt aber auch Sicherheitsrisiken, da direkt auf das Gerät zugegriffen werden muss. Eine Cloud-Lösung bietet die Möglichkeit, Daten auch außerhalb des

Produktionssysteme zur Verfügung zu stellen. Ein Nachteil kann hier eine verminderte Rechenleistung aufgrund der Datenübertragung über das Internet sein. Wird kein Fernzugriff auf das Informationsmodell benötigt, bietet sich die Speicherung am Edge an. Die Datensicherheit ist hier größer als die direkte Speicherung auf dem Gerät, eine Realisierung ist nicht geräteabhängig und es ist nicht mit Leistungseinbußen aufgrund von Datenübertragung zu rechnen. Zur erfolgreichen Implementierung eines digitalen Zwillings ist eine Kombination zu bevorzugen – Edge Computing für rechenzeitkritische, echtzeitnahe Anwendungen und Cloud Computing zur Sicherung, Weiterverarbeitung und Analyse großer Datenmengen.

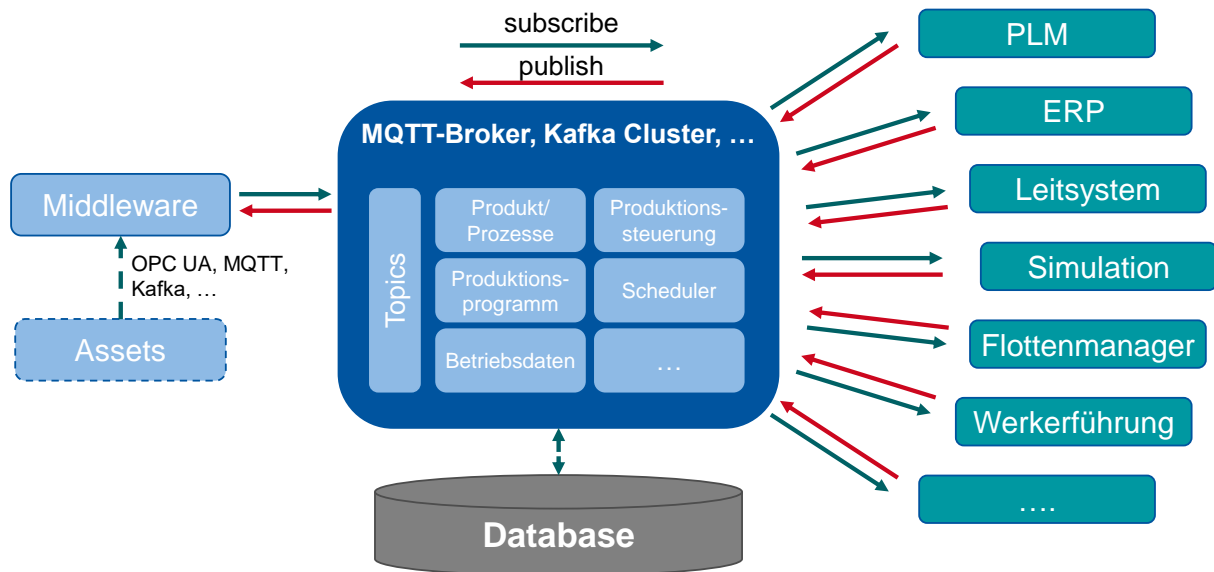


Bild 4: Beispielhafter Aufbau einer Kommunikationsarchitektur mit MQTT oder Kafka

## Schnittstellen und Kommunikation

Zur Gewährleistung einer erhöhten Wandlungsfähigkeit und Rekonfigurierbarkeit müssen auch die Schnittstellen in der Systemarchitektur so aufgebaut sein, dass Änderungen einfach umsetzbar sind. Auch dafür bietet die Nutzung von Standards großen Mehrwert. Um alle Daten in ein einheitliches Format zu bringen (z.B. das einer Verwaltungsschale) ist zunächst eine Middleware notwendig. In dieser werden die unterstützten Kommunikationswege der Assets genutzt, um diese zu standardisieren und anschließend durch ein offenes Kommunikationsprotokoll weiterzuleiten. Eine beispielhafte Architektur für diese Schnittstellen ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Daten der Assets werden über eine Middleware einer zentralen Einheit bereitgestellt, dort *Topics* zugeordnet und können dann von allen weiteren Einheiten abgerufen werden. Übliche Protokolle, die vermehrt Anwendung finden, sind MQTT und Apache Kafka [9,10]. Es sind auch durchaus Kombinationen denkbar, da MQTT vor allem für eine schnelle Verarbeitung an der Edge vorteilhaft ist und sich Kafka gut für die Verteilung großer Datenmengen in die weiteren Systeme eignet. Durch die Nutzung der einheitlichen Struktur können mit geringem Aufwand neue Einheiten hinzu- oder weggenommen und der Datenaustausch vereinfacht werden, da nicht alle Schnittstellen einzeln definiert werden müssen.

## Fazit und Ausblick

Dieser Beitrag gibt dem Leser einen Überblick über die wichtigsten Bestandteile für die digitale Umsetzung in der frei verketteten Montage. Nur wenn IT-seitig auch flexible, digitale Lösungen

Postprint. Erstveröffentlichung: Rachner, Jonas; Hort, Simon; Schmitt, Robert H. (2020): Digitale Lösungen zur Steuerung frei verketteter Montagesysteme. Realisierung von flexiblen Routen im Kontext Industrie 4.0, in: Industrie 4.0 Management 36 (6), S. 43-47.

geboden werden, können individuelle Bearbeitungsrouten auf dem Shopfloor effizient realisiert werden. Es wird eine strukturierte Systemarchitektur mit klarer Aufgabenverteilung aufgezeigt und die Notwendigkeit eines flexiblen und adaptiven Leitsystems herausgestellt. Bei der Integration des digitalen Zwillings werden bestehende Standards aufgezeigt und Speicher- bzw. Verarbeitungsorte empfohlen. Weiterhin ermöglichen standardisierte Protokolle und offene Schnittstellen eine verlässliche Interaktion der Systemkomponenten und eine aufwandsarme Integration. Da viele Standards aber noch nicht ausgereift und nicht in der Praxis erprobt sind, bedarf es hier noch weiterem Forschungsbedarf.

#### *Schlüsselwörter:*

Industrie 4.0, IoT, Systemarchitektur, Verwaltungsschale, Montagesystem, Digitalisierung

*Diese Arbeit ist Teil des Forschungsprojekts "AIMFREE", das vom Bundesministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie (BMWi) im Rahmen der "Richtlinie über eine gemeinsame Förderinitiative zur Förderung von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Elektromobilität" (Förderkennzeichen: 01MV19002A) gefördert und vom Projektträger Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR-PT) unterstützt wird. Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor.*

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Literatur

- [1] Schmitt, R. H.; Göppert, A.; Hüttemann, G., et al.: Frei verkettete wandlungsfähige Montage. In: Brecher, C. et al. (Hrsg.): Internet of Production für agile Unternehmen. Aachen, 2017, S. 339–368
- [2] Daniel Küpper; Christoph Sieben; and Kristian Kuhlmann, et al.: Will Flexible-Cell Manufacturing Revolutionize Carmaking? (2018)
- [3] Göppert, A.; Rachner, J.; Schmitt, R. H.: Automated scenario analysis of reinforcement learning controlled line-less assembly systems (in-press). In: Procedia CIRP, 2020
- [4] ANSI/ISA 95 (2013): Enterprise-Control System Integration
- [5] Jung, S.; Grunert, D.; Schmitt, R.: Service-oriented Communication and Control System Architecture for Dynamically Interconnected Assembly Systems. In: Schüppstuhl, T. et al. (Hrsg.): Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter. Berlin, Heidelberg, 2018, S. 223–229
- [6] Plattform Industrie 4.0: Verwaltungsschale in der Praxis; URL: [www.plattform-i40.de](http://www.plattform-i40.de); Berlin (2019)
- [7] eCI@ss; URL: <https://www.eclass.eu> [Stand: 25.06.2020]
- [8] Malakuti, S.; Goldschmidt, T.; Koziolk, H.: A Catalogue of Architectural Decisions for Designing IIoT Systems. In: Cuesta, C. E. et al. (Hrsg.): Software Architecture. Cham, 2018, S. 103–111
- [9] MQTT; URL: <https://mqtt.org/> [Stand: 30.06.2020]
- [10] Kafka; URL: <https://kafka.apache.org/> [Stand: 30.06.2020]

## Abstract

Due to an increased product variety, the need for flexibly configured assembly systems is steadily growing. In contrast to classic assembly lines with predominantly rigid conveyor technology, efficient, individual assembly routes with cycle-independent processing times are implemented in a dynamically interconnected assembly system using intelligent control and AGVs. Challenges during the implementation are, in addition to the rearrangement of workstations on the shop

Postprint. Erstveröffentlichung: Rachner, Jonas; Hort, Simon; Schmitt, Robert H. (2020): Digitale Lösungen zur Steuerung frei verketteter Montagesysteme. Realisierung von flexiblen Routen im Kontext Industrie 4.0, in: Industrie 4.0 Management 36 (6), S. 43-47.

floor, the adaptation of existing IT systems and the creation of a consistent data landscape. This article presents the most important factors for the IT-related implementation of a dynamically interconnected assembly system and shows which existing standards from the field of Industry 4.0 can be used for this purpose.

*Keywords:*

*Industry 4.0, IoT, System architecture, Asset Administration Shell, Assembly, Digitalization*