

# Adaptive Steuerungssoftware für die frei verkettete Montage

Ein serviceorientierter Ansatz zur adaptiven Prozesssteuerung

Julius B. Mathews\*,  
Simon Hort und  
Robert H. Schmitt

## Herausforderungen – Freie Verkettung zur Herstellung kundenindividueller Produkte

In den letzten Jahren haben der vermehrte Wunsch nach kundenindividuellen Produkten sowie steigende Kundenanforderungen zu einer erhöhten Produktvarianz und verkürzten Produktlebenszyklen auf Seiten der Industrie geführt [1–3]. Montagesysteme, welche dem Fließprinzip der schlanken Produktion folgen, sind häufig hocheffizient [2, 4]. Bei dieser Organisationsform werden auf örtlich fixen, dem Produktionsprozess entsprechend angeordneten Montageressourcen Arbeitsgänge bearbeitet [2, 4]. Durch die Zuordnung der Arbeitsgänge zu den jeweiligen Ressourcen ergibt sich

Durch gestiegene Variantenvielfalt wird in der Linienmontage der Produktfluss erschwert, die Stationsauslastung sinkt und die Kosten steigen. Einen Lösungsansatz bietet die frei verkettete Montage. Hierfür wird die Linie ähnlich dem Werkstattprinzip neu angeordnet und durch fahrerlose Transportfahrzeuge gekoppelt. Dieser Beitrag erklärt die Herausforderungen der frei verketteten Montage und wie deren Potenziale durch die Implementierung einer adaptiven Steuerungssoftware gehoben werden können.

nach erfolgter Austaktung eine systemübergreifend feste Taktzeit [2, 4]. Auf Grund größer werdender Produktvielfalt, kleiner werdender Losgrößen und damit einhergehend stärker schwankenden Prozesszeiten wird dieser Montagefluss stör anfälliger [2, 4, 5]. Infolgedessen kommt es zu Taktzeitschwankungen und die durchschnittliche Auslastung der Montageressourcen beginnt zu sinken [2, 4, 5]. Dieser Effekt wird weiter verstärkt durch Stillstände, welche aus Rekonfigurationen und Umbauten bei Skalierungen der Montageressourcen resultieren und so die ganze Montage betreffen [5]. Da die einzelnen Montagestationen und Arbeitsgänge starr miteinander verkettet sind, behindert eine Störung den gesamten Fluss [2, 5].

Ein Lösungsansatz ist die Steigerung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit des Montagesystems durch die

Umsetzung des Konzepts der frei verketteten Montage [5]. Hierfür wird die Linie der Montagestationen aufgelöst. Danach werden diese ähnlich dem Werkstattprinzip frei angeordnet und durch fahrerlose Transportsysteme flexibel gekoppelt [4, 5]. Bild 1 zeigt ein Beispiel für eine frei verkettete Montage und deren wichtigste Umsetzungsfaktoren. Die freie Anordnung der Stationen entsteht durch die Parallelisierung einer Linie durch eine zweite Linie [5, 6]. Grundsätzlich sind aber auch ein Matrix-Layout oder andere Formen denkbar [5, 6]. Die vorher zeitlich und logisch starre Abfolge der Arbeitsgänge wird aufgelöst, sodass für jedes Produkt eine individuelle Montageabfolge der einzelnen Stationen entsteht [5].

Der Betrieb eines frei verketteten Montagesystems birgt wirtschaftlich großes Potenzial [5, 6]. Grundsätzlich nimmt

\* Korrespondenzautor  
Julius B. Mathews, M.Sc.  
Fraunhofer-Institut  
für Produktionstechnologie IPT  
Steinbachstraße 17, 52074 Aachen  
Tel: +49 (0) 241 8904 327  
julius.mathews@ipt.fraunhofer.de

### Hinweis

Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen von den Mitgliedern des ZWF-Advisory Board wissenschaftlich begutachteten Fachaufsatz (Peer-Review).

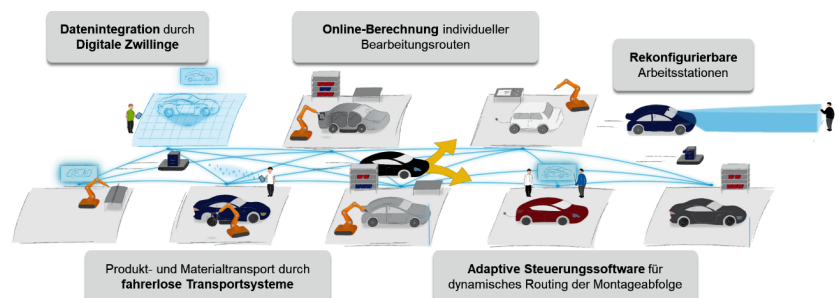


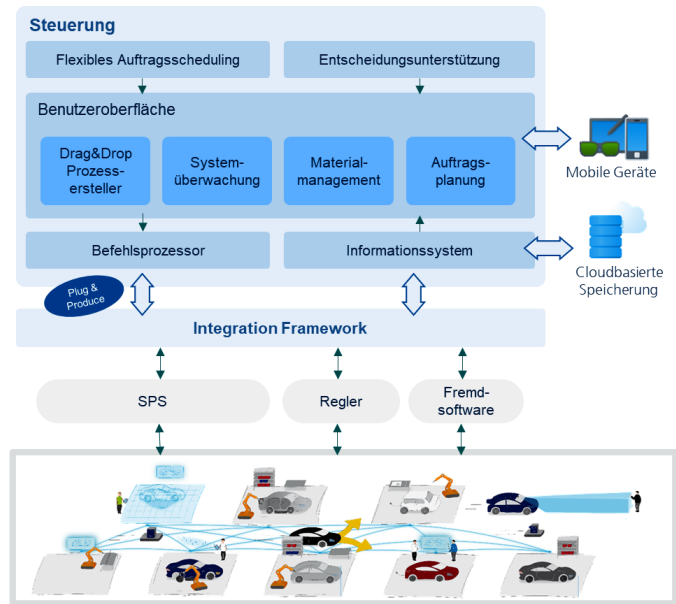
Bild 1. Beispiel einer frei verketteten Montage in der automobilen Endmontage und wesentlicher Umsetzungsfaktoren [7]

die Montage als letzter Schritt der Herstellung von komplexen Produkten bis zu 50 Prozent der Produktionszeit in Anspruch [2]. Dies spiegelt sich auch in einem Anteil von bis zu 20 Prozent der Gesamtkosten und 20 bis 70 Prozent der mit der Produktion verbundenen Arbeitskosten wider [2, 6]. Simulationen der Boston Consulting Group und der ipolog GmbH haben für eine variantenreiche Produktion gezeigt, dass in einem frei verketteten Montagesystem im Vergleich zu einer Linienmontage die Auslastung der Werkenden um bis zu 12 Prozent gesteigert und damit die Produktionskosten potenziell gesenkt werden konnten [8].

Produktspezifische Bearbeitungsreihenfolgen für die jeweiligen Montageressourcen erleichtern eine parallele Produktion unterschiedlicher Varianten [5]. Wenn eine Station belegt ist, kann auf eine mögliche alternative Ressource zugegriffen werden, ohne dass die definierte Reihenfolge der Linie berücksichtigt werden muss [5]. Auf diese Weise lassen sich Engpässe einfach vermeiden und bei Bedarf benötigte Kapazitäten schnell erhöhen. Dementsprechend führen Rekonfigurationen und Umbauten einzelner Montagestationen nicht mehr zu Unterbrechungen wie bei der Linienmontage [5]. Das gesamte Montagesystem wird flexibler, wandlungsfähiger und damit resilienter gegen Störungen und einfach erweiterbar für neue Produktvarianten. Zudem können kundenindividuelle Produkte auch in kleinen Losgrößen kosteneffizient produziert werden [5].

Wie in Bild 1 angedeutet, bergen die Einführung und der weiterführende Betrieb eines frei verketteten Montagesystems sowohl technische als auch organisatorische Herausforderungen [5, 6]. In der Materialwirtschaft bedarf es eines frei navigierenden Transportsystems für die Intralogistik [5, 6]. Dazu müssen ein Modell zur Abbildung des Transfersystems und komplexe Transportlogik genutzt werden [5, 6]. Diese legt fest, wann welches Teil oder Produkt unter Berücksichtigung entsprechender Prioritäten zu transportieren ist und welche der vorgegebenen Routen optimalerweise dafür verwendet werden [5, 6]. Um eine verzögerungsfreie Materialbereitstellung

Bild 2. Steuerungsarchitektur für die Steuerung eines frei verketteten Montagesystem am Beispiel der automobilen Endmontage (i. A. an [16, 17])



an den Ressourcen gewährleisten zu können, muss die vorgelagerte Materialbeschaffung in diesen Prozess integriert sein und mit entsprechender Genauigkeit die Materialverfügbarkeit vorher-sagen [6].

Für eine sinnvolle Planung der Montageaufgaben und den damit verbundenen logistischen Vorgängen wird eine kontinuierlich planende Steuerungssoftware benötigt [5, 6]. Idealerweise wird diese daher mit allen für die Planung und Steuerung notwendigen Daten aus den relevanten IT-Systemen (wie z.B. ERP, PLM, etc.) und dem Produktionssystem versorgt [5, 9]. Für die Anbindung von letzterem müssen alle physischen Entitäten auf dem Shopfloor, die sogenannten Assets, wie z.B. Montagestationen, Materialien, Produkte und fahrerlose Transportfahrzeuge, integriert werden [5, 6]. Die Datenintegration geschieht über die Nutzung von Digitalen Zwillingen [10]. Grundsätzlich handelt es sich beim Digitalen Zwilling um das Informationsmodell eines Assets [7, 10]. Mit anderen Worten ist dies eine digitale Repräsentation der physischen Entität, welche in der Lage ist über standardisierte Schnittstellen dessen Daten bereit zu stellen [7, 10]. Die Anforderung an die Qualität und zeitliche Verfügbarkeit der Daten für die Nutzung durch die Steuerungssoftware ist hoch [5]. Um in der Planung Verzögerungen durch fehlende

Teile, Defekte oder Ausfälle verhindern zu können, muss das dynamische Routing durch die Steuerungssoftware in kurzer Zeit erfolgen können [5, 6]. Je nach Anzahl der zu planenden Ressourcen ist das Lösen dieses komplexen multikriteriellen Optimierungsproblems bei gefordert niedriger Rechenzeit eine Herausforderung [11, 12].

### Digitale Lösungen zur Steuerung frei verketteter Montagesysteme

Aus diesen Herausforderungen ergeben sich für die erfolgreiche Steuerung eines frei verketteten Montagesystems die folgenden drei technologischen Kernanforderungen [5, 13, 14]:

- Datenintegration des gesamten Montagesystems durch die Nutzung von Digitalen Zwillingen,
- Planung der dynamischen Produktreihen und die adaptive Steuerung des Montageprozesses unter Berücksichtigung des aktuellen Systemzustands sowie
- Online-Berechnung individueller Bearbeitungsrouten.

In den letzten zehn Jahren wurde speziell für diese Aufgaben am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT die Steuerungssoftware COPE für modulare Produktion im Bereich der Automobilindustrie und der Biotechno-

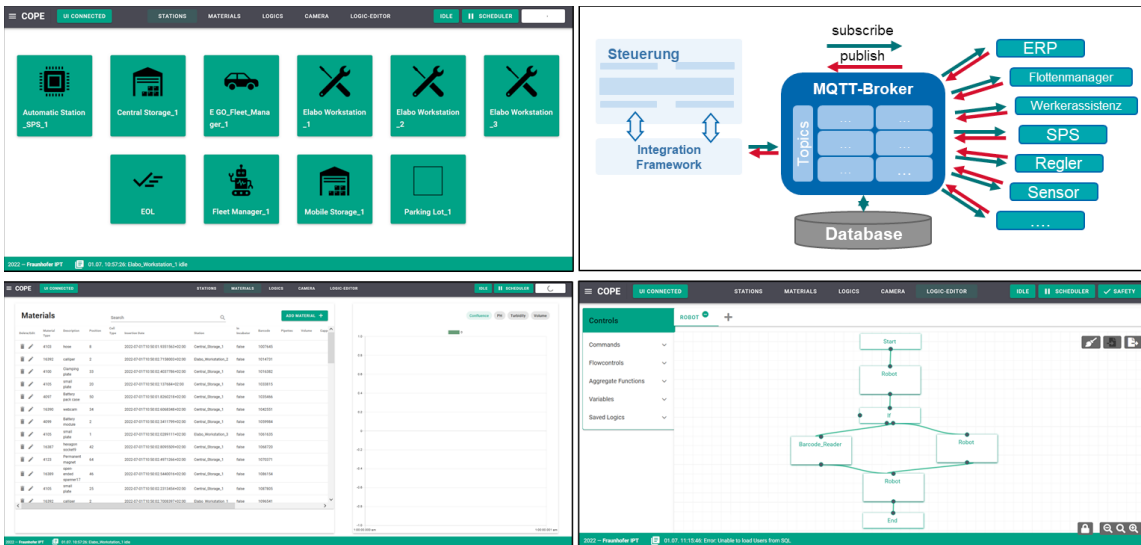


Bild 3. Stationsüberblick der Steuerungssoftware (o. l.); MQTT-Kommunikation zwischen Steuerungssoftware, Assets und IT-Systemen [7] (o. r.); Materialmanagement der Steuerungssoftware (u. l.); Drag & Drop-Prozessersteller der Steuerungssoftware (r. u.)

logie entwickelt [15]. Als zentrale Softwarekomponente der Montage kommuniziert sie mit allen umliegenden Softwaresystemen wie z. B. Business-IT-Systemen, dem Flottenmanagement, der Werkerassistenz und Geräten und Maschinen auf dem Shopfloor [7, 16]. Darüber hinaus überwacht und steuert die Software alle Produktionsprozesse basierend auf aktuellen Daten aus der Montage, wie z. B. Maschinenzustände, Prozessparameter und Produktqualität [7, 16]. Bild 2 zeigt die Bestandteile der Softwarearchitektur. Die wichtigsten Funktionen und Zusammenhänge der einzelnen Softwaremodule werden im Folgenden vorgestellt.

Das Integration Framework dient als Middleware und ermöglicht die Kommunikation zwischen der Steuerungssoftware und allen physischen Entitäten auf dem Shopfloor, wie z. B. Maschinen, Geräten und Sensoren. Für jedes Asset wird innerhalb der Software ein DZ angelegt, der verschiedene Informationen, etwa zum Status, und zu weiteren erfassten Parametern enthält. Darüberhinaus werden die Funktionalitäten aller Assets als parametrisierbare Services standardisiert.

Durch die Verwendung von Protokollen wie MQTT oder OPC UA lassen sich Assets mit unterschiedlichen Schnittstellen an die Steuerungssoftware anbinden. Für die Kommunikation mit einer großen Anzahl von Geräten auf dem Shopfloor ist MQTT ideal geeignet [18]. Dieses

Protokoll funktioniert nach dem Publish/Subscribe-Prinzip [18]. Die Absender von Nachrichten veröffentlichen (engl. publish) ihre Informationen an einer zentralen Stelle, dem MQTT-Broker, auf bestimmten Topics [18]. Alle Empfänger, die dieses Topic aboniert (engl. subscribe) haben, erhalten dann über den MQTT-Broker die versendete Nachricht [18]. Eine schematische Darstellung für die Kommunikation zwischen Steuerungssoftware und den Assets befindet sich in Bild 3 (o. r.).

Auf diese Weise bindet das Integration Framework die einzelnen Assets an den Befehlsprozessor und das Informationssystem der Steuerungssoftware an. Über den Befehlsprozessor werden die jeweiligen Services der Assets angesteuert. Bevor ein solcher Befehl startet, überprüft der Befehlsprozessor alle für die Ausführung notwendigen Bedingungen. Soll an einer manuellen Montagestation der Service „Montage von zwei Bauteilen“ ausgeführt werden, wird zuerst kontrolliert, ob die Station bereit ist und alle notwendigen Materialien vorhanden sind. Erst danach startet die Montage indem alle notwendigen Informationen dem Werkenden zur Verfügung gestellt werden.

Alle auf dem Shopfloor erfassten relevanten Daten zum Beispiel zu Produkten, Materialien und Assets oder aus dem Herstellungsprozess werden im Informationssystem verarbeitet und in einer Datenbank gespeichert. Der

Nutzer kann die gesammelten Informationen über die verschiedenen Ansichten der Benutzeroberfläche über das Materialmanagement (Bild 3, u. l.), die Systemüberwachung (Bild 3, o. l.) oder die Auftragsplanung einsehen. Über den Drag & Drop-Prozessersteller werden die Services der einzelnen Assets zu Prozessketten verknüpft. Hierbei lassen sich nicht nur linear ablaufende Prozesse erstellen, sondern auch deutlich komplexere Abläufe abbilden. Auf diese Weise werden die Freiheiten in der für die Montage wichtigen Verbaureihenfolge ausgenutzt, um eine höhere Flexibilität in der Produktmontage zu ermöglichen (Bild 3, u. r.).

Das flexible Auftragscheduling und die Entscheidungsunterstützung helfen dem Nutzer die Steuerung der gesamten Produktion zu verbessern. Hierbei reagiert das flexible Auftragscheduling auf Ereignisse wie neue Fertigungsaufträge, den Ausfall von Maschinen oder Produktdefekte und optimiert die Abarbeitung der einzelnen Prozessvorgänge respektive Services. Dies verkürzt die Durchlaufzeit der einzelnen Fertigungsaufträge und erhöht die Auslastung der Anlagen. Bei der Entscheidungsunterstützung werden Handlungsempfehlungen für den Nutzer mithilfe künstlicher Intelligenz erzeugt und verständlich dargestellt. Zum Beispiel bei einem fehlerhaften Bauteil erfährt der Nutzer, ob es sinnvoller ist, die Baugruppe auszuschleusen oder zur Nacharbeit zu schicken.



3. Brecher, C.: Integrative Production Technology for High-Wage Countries. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2012  
DOI: 10.1007/978-3-642-21067-9
4. Dombrowski, U.; Mielke, T.: Ganzheitliche Produktionssysteme. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2015  
DOI: 10.1007/978-3-662-46164-8
5. Göppert, A.; Hüttemann, G.; Jung, S.; Grunert, D.; Schmitt, R.: Frei verkettete Montagesysteme. ZWF 113 (2018) 3, S. 151–155  
DOI: 10.3139/104.111889
6. Huettemann, G.; Gaffry, C.; Schmitt, R.H.: Adaptation of Reconfigurable Manufacturing Systems for Industrial Assembly – Review of Flexibility Paradigms, Concepts, and Outlook. Procedia CIRP 52 (2016), S. 112–117  
DOI: 10.1016/j.procir.2016.07.021
7. Rachner, J.; Hort, S.; Schmitt, R.H.: Digitale Lösungen zur Steuerung frei verketteter Montagesysteme: Realisierung von flexiblen Routen im Kontext Industrie 4.0. Industrie 4.0 Management 36 (2020), S. 43–47
8. Küpper, D.; Sieben, C.; Kuhlmann, K.; Lim, Y.H.; Ahmad, J.: Will Flexible-Cell Manufacturing Revolutionize Carmaking, 2018
9. Schuh, G.; Stich, V.: Produktionsplanung und -steuerung 2. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2012  
DOI: 10.1007/978-3-642-25427-7
10. Göppert, A.; Grahn, L.; Rachner, J.; Grunert, D.; Hort, S.; Schmitt, R.H.: Pipeline for Ontology-based Modeling and Automated Deployment of Digital Twins for Planning and Control of Manufacturing Systems. Journal of Intelligent Manufacturing (2021)  
DOI: 10.1007/s10845-021-01860-6
11. Göppert, A.; Rachner, J.; Schmitt, R.H.: Automated Scenario Analysis of Reinforcement Learning Controlled Line-less Assembly Systems. Procedia CIRP 93 (2020), S. 1091–1096  
DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.116
12. Grahn, L.; Rachner, J.; Göppert, A.; Saeed, S.; Schmitt, R.H.: Framework for Potential Analysis by Approximating Line-less Assembly Systems with AutoML. In: Andersen, A.-L.; Andersen, R.; Brunoe, T.D.; Larsen, M.S.S.; Nielsen, K.; Napoleone, A.; Kjeldgaard, S. (Hrsg.): Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems: Proceedings of the 8<sup>th</sup> Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference (CARV 2021) and the 10th World Mass Customization & Personalization Conference (MCPC 2021), Aalborg, Denmark, October/November 2021, 1st ed. 2022; Springer International Publishing; Imprint: Springer-Verlag, Cham 2022, S. 423–430  
DOI: 10.1007/978-3-030-90700-6\_48
13. Hüttemann, G.; Buckhorst, A.F.; Schmitt, R.H.: Modelling and Assessing Line-less Mobile Assembly Systems. Procedia CIRP 81 (2019), S. 724–729  
DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.184
14. Grunert, D.; Göppert, A.; Hort, S.; Rachner, J.; Grahn, L.; Schmitt, R.H.: Modelling for Decision-making in Dynamical Line-less Assembly Systems, 2021
15. Hort, S.: Flexible Produktionssysteme: Effiziente Automatisierung in hochindividuellen Produktionsumgebungen. Online unter <https://www.ipt.fraunhofer.de/de/kompetenzen/Produktionsqualitaet-undMesstechnik/Produktionsmesstechnik/flexible-produktionssysteme.html> [Abruf am 01.07.2022]
16. Hort, S.; Nießing, B.; Jung, S.; Schmitt, R.: Smarte Steuerung flexibler Produktionssysteme – Ein service-orientierter Ansatz zur Automatisierung adaptiver, individueller Prozesse. wt Werkstattstechnik online 110 (2020) 11–12, S. 768–771  
DOI: 10.37544/1436-4980-2020-11-12-32
17. Hort, S.; Herbst, L.; Bäckel, N.; Erkens, F.; Niessing, B.; Frye, M.; König, N.; Papantoniou, I.; Hudecek, M.; Jacobs, J.J.L.; et al.: Toward Rapid, Widely Available Autologous CAR-T Cell Therapy – Artificial Intelligence and Automation Enabling the Smart Manufacturing Hospital. Front. Med. (Lausanne) (2022) 9, 913287  
DOI: 10.3389/fmed.2022.913287
18. Hillar, G.C.: MQTT Essentials: A Lightweight IoT Protocol: The Preferred IoT Publish-subscribe Lightweight Messaging Protocol. Packt Publishing, Birmingham, UK 2017
19. Rachner, J.: AIMFREE: Agile Montage von Elektrofahrzeugen durch freie Verkettung. Online unter <http://aimfree.wzl.rwth-aachen.de/de/default.html> [Abruf am 01.07.2022]

**Die Autoren dieses Beitrags**

Julius B. Mathews, M.Sc., geb. 1994, studierte Wirtschaftsingenieurwesen Fachrichtung Maschinenbau mit Schwerpunkt Produktionstechnik an der RWTH Aachen. Seit 2021 ist er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT in der Abteilung für Produktionsmesstechnik mit Arbeitsschwerpunkt Adaptive Produktionssteuerung.

Simon Hort, M.Sc., geb. 1991, studierte im Bachelor Wirtschaftsingenieurwesen Fachrichtung Maschinenbau mit Schwerpunkt Produktionstechnik an der RWTH Aachen. Im Master studierte er Wirtschaftsingenieurwesen am KIT in Karlsruhe mit Schwerpunkt Digitalisierung in der Produktion. Seit 2019 ist er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT in der Abteilung für Produktionsmesstechnik mit Arbeitsschwerpunkt Adaptive Produktionssteuerung. Seit 2021 leitet er dort auch die Gruppe Adaptive Produktionssteuerung.

Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt, geb. 1961, war nach dem Studium der Elektrischen Nachrichtentechnik an der RWTH Aachen Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement. 1997 wechselte Professor Schmitt zur MAN Nutzfahrzeuge AG in München, wo er leitende Positionen im Qualitätsbereich und in der Produktion innehatte. Zum 1. Juli 2004 wurde er als Professor an die RWTH Aachen berufen. Er ist als Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement, Mitglied des Direktoriums des Werkzeugmaschinenlabors WZL und des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie IPT.

**Abstract**

Adaptive Control Software for Dynamically Interconnected Assembly – A Service-oriented Approach to Adaptive Process Control. Due to the increased number of variants, the product flow in line assembly is impeded, station utilization decreases, and costs increase. Here, the concept of dynamically interconnected assembly offers a solution. Therefore, the assembly line is dissolved, then the stations are positioned freely and linked by automated guided vehicles. This article explains the challenges of dynamically interconnected assembly and how its potentials can be exploited by implementing an adaptive control software.

**Förderhinweis**

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.

**Schlüsselwörter**

Industrie 4.0, Adaptive Produktionssteuerung, Digitaler Zwilling, Flexible Montage, Matrix-Montagesystem, Steuerungssoftware

**Keywords**

Industry 4.0, Adaptive Production Control, Digital Twin, Flexible Assembly, Matrix Assembly System, Control Software

Bibliography  
 DOI 10.1515/zwf-2022-1113  
 ZWF 117 (2022) 9; page 580–584  
 © 2022 Walter de Gruyter GmbH,  
 Berlin/Boston, Germany  
 ISSN 0947-0085 · e-ISSN 2511-0896